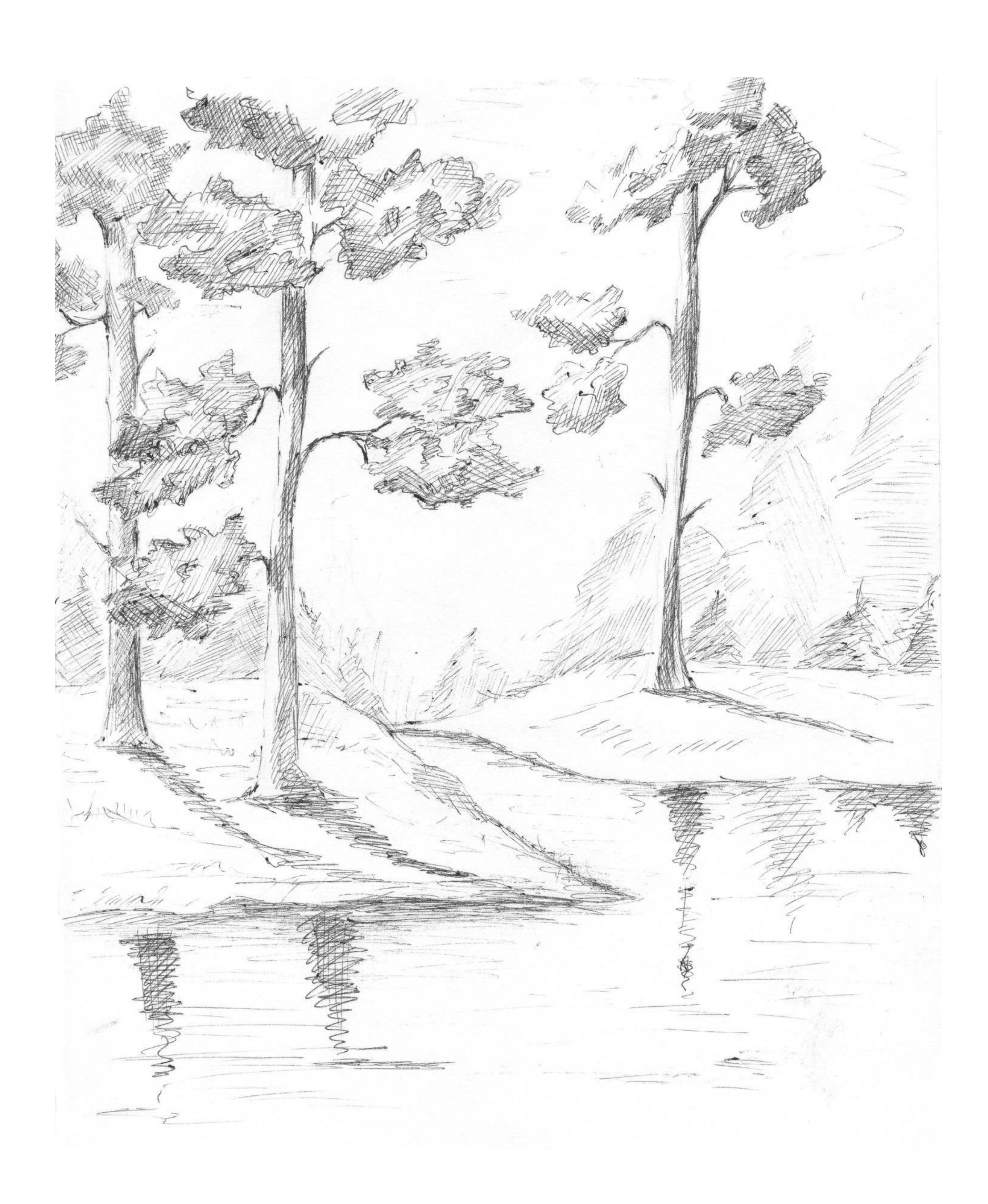
ISSN: 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 2 Выпуск 1



ГИДРОСФЕРА.
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 2, Выпуск 1

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

Учредители журнала

Научно-исследовательский центр «Геодинамика»
Научно-производственное объединение «Гидротехпроект»
Институт водных проблем Российской академии наук

HYDROSPHERE.
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA
(GIDROSFERA.
OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Volume 2, Issue 1

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

Founders

Research Center «Geodynamics»
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Кадацкой Марии Михайловны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.

Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru from technical editor **Mariya Kadatskaya**.

Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.

Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77-76914** from 11.10.2019

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Санкт-Петербург, 14-я линия В.О.
д. 97 пом. 3н.

Для почтовых отправлений: 199155 Санкт-Петербург, а/я 136, Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»

Тел. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»

EDITORIAL ADDRESS:

St. Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island,
97 of. 3n.

For corresponding: 199155 St. Petersburg, PO Box 136. Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»

Tel. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 551.311.8
DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.8

СЕЛЕПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В ПРИУСТЬЕВЫХ ЧАСТЯХ РЕК ОСТРОВА САХАЛИН

Д.А. Боброва, Е.Н. Казакова
ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; Научно-исследовательский центр «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск, Россия
darya-kononova@yandex.ru

DEBRIS FLOW CHECK CONSTRUCTIONS SITUATED NEAR THE MOUTH OF RIVERS OF THE SAKHALIN ISLAND

Darya A. Bobrova, Ekaterina N. Kazakova
Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; Research Center "Geodynamics", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
darya-kononova@yandex.ru

Аннотация. Автомобильные и железные дороги острова Сахалин, а также многие населенные пункты на большом протяжении расположены вдоль береговой линии моря, в нижней части зоны транзита селей. Селевые потоки причиняют ущерб в виде завалов и повреждений дорожного полотна. В некоторых районах острова расположены участки, где количество селевых бассейнов составляет 30-40 шт/км. В основном это склоновые сели, которые формируются ежегодно во время выпадения жидких осадков и объем которых может достигать 500 м^3. В то же время селевые потоки могут выполнять важную роль в формировании пляжей и защите от абразии за счет выноса материала в приустьевую часть водотоков. Вынос селевого материала в береговую зону на острове Сахалин осуществляется на побережьях заливов Терпения, Анива, Татарского пролива и на других участках. Пляжевые накопления, узкой полосой протягивающиеся вдоль морского берега, являются лучшей его природной защитой от разрушения. Поэтому необходимость строительства селепропускных сооружений обусловлена не только потребностью в защите дорожного полотна, но и

Abstract. The significant part of roads and railways of the Sakhalin Island are located in the coastal zone of the sea, in the lower part of the debris flow transit zone. Debris flows cause blockages and damage to the roadways. In some areas of the island are sites where the number of debris flow basins is 30-40 per km. Basically, these are slope debris flows, which are formed annually during precipitation of liquid precipitation, and whose volume can reach 500 m^3. At the same time, debris flows can play an important role in the formation of beaches and protection from abrasion due to the removal of material to the mouth of the rivers. Transport of debris flow material to the coastal zone on the Sakhalin Island is carried out on the coasts of the Gulf of Patience, the Gulf of Aniva, the Tatar Strait, etc. Beach savings are the best of its natural protection against destruction. Therefore, the need to build seepage facilities is due not only to the need to protect the roadway, but also the importance of transporting debris flow material to the beach area. Characteristics of debris flows in the coastal zone of the island differ in a number of parameters, such as the volume of debris slides, the frequency of formation of debris flows, the type of debris flows, the size of carried fragments of rocks; therefore, when

Bobrova D.A., Kazakova E.N. Debris flow check constructions situated near the mouth of rivers of the Sakhalin island. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 8-18 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.8

важностью транспортировки селевого материала в пляжевую зону. Характеристики селевых потоков в береговой зоне острова отличаются по ряду параметров, таких как объем селей, частота формирования селей, тип селей, размер переносимых обломков горных пород, поэтому при выборе селезащитного сооружения необходимо руководствоваться как параметрами селевых потоков, так и ролью селевых отложений в формировании пляжей. В работе рассматривается современное состояние водо- и селепропускных устройств под дорогами в приустьевых частях селевых рек, а также целесообразность выбора селезащитных сооружений в зависимости от характеристик селей и селевых бассейнов.

Ключевые слова: остров Сахалин; береговая зона; характеристики селей; селепропускные сооружения; выбор селезащитного сооружения; склоновые сели.

choosing a debris flow protection facility, it is necessary to be guided both by the parameters of debris flows and by the role of debris flows in the formation of beaches. The paper examines the current state of water chute and debris flows chute under the roads in the near-mouth parts of debris flow rivers, as well as the expediency of selecting debris flow protection structures depending on the characteristics of debris flows.

Keywords: Sakhalin Island; coastal zone; characteristics of debris flows; debris flows chute; choice of debris flows protection facility; slope debris flows.

Введение

Высокую степень площадной пораженности береговой зоны острова Сахалин селевыми процессами обусловливает сочетание гористого рельефа и большой густоты речной сети [Перов, 2012]. Наибольшая густота речной сети отмечается в юго-западной и юго-восточной частях острова, где она достигает 1,5-2 км/км^2. 98% общего числа рек составляют мелкие реки, имеющие длину менее 10 км и средневзвешенные уклоны 100-300‰, что обусловлено близостью основных водоразделов к морскому побережью [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1973]. Благодаря этому селевые потоки в прибрежной части острова характеризуются коротким временем добегания до объектов, расположенных в приустьевой части селевых водотоков, а также наибольшими селевыми расходами именно в этой зоне.

На острове Сахалин сотни километров автомобильных и железных дорог, а также территории многих населенных пунктов расположены между уступами морских террас и морем, в нижней части зоны транзита селей, где расход селевых потоков наибольший, а водопропускные сооружения под дорожным полотном подвергаются максимальным нагрузкам.

Селевые потоки на острове причиняют главным образом экономический ущерб за счет прекращения движения транспорта при завалах дорожного полотна, который может в несколько раз превышать стоимость прямого ущерба от повреждений и разрушений селевыми потоками объектов и сооружений.

В то же время селевые потоки могут выполнять важную роль в формировании пляжей и защите от абразии за счет выноса материала в приустьевую часть водотоков и формирования пляжей [Олиферов, 2007; Faccini, Piccazzo, Robbiano, 2009]. Селевой материал увеличивает мощность пляжа и защищает от волновых воздействий и размыва расположенные в береговой зоне транспортные магистрали, линии электропередач и территории населенных пунктов, в связи с чем полная блокировка поступления селевых отложений в береговую зону нежелательна.

Таким образом, водопропускные сооружения должны выполнять роль селепропусков, предотвращая повреждения и

завалы дорожного полотна и не препятствуя выносу селевого материала в береговую зону. С другой стороны, на острове Сахалин есть участки с большой площадной пораженностью селевыми процессами (30-40 маленьких склоновых селевых бассейнов на погонный километр, где сели средним объемом 50-100 м^3 формируются ежегодно во время выпадения жидких осадков), где строительство селепропускных сооружений экономически нецелесообразно, но принятие решений по противоселевой защите необходимо в связи с регулярными завалами дорог.

В работе приводится описание водо- и селепропускных сооружений в приустьевой части селевых водотоков острова Сахалин, а также описание участков, для которых следует в качестве селезащитного сооружения рассматривать селевые ловушки.

Постановка проблемы

Несмотря на то, что для острова Сахалин характерна высокая площадная пораженность береговой зоны селевыми потоками, почти под всеми объектами дорожной инфраструктуры установлены водопропуски, которые не способны выполнять роль селепропускных сооружений – они не предотвращают завалы и повреждения дорожного полотна, а также блокируют выносы селевого материала в береговую зону.

Такая ситуация наблюдается практически повсеместно на проложенных вдоль берега моря автомобильных и железных дорогах острова Сахалин, а также в границах населенных пунктов острова, таких как Невельск, Холмск, Макаров (рисунок 1). Суммарная протяженность участков дорог, расположенных в береговой зоне, где осуществляется вынос селевого материала на пляж, составляет около 300 км.



Рисунок 1. Карта-схема участков дорог, расположенных в приустьевой части селевых водотоков острова Сахалин. Цифрами обозначено: 1 – автодороги федерального значения; 2 – автодороги регионального значения; 3 – автодороги местного значения; 4 – железные дороги; 5 – участки, где дороги расположены в приустьевых частях селевых водотоков.

Figure 1. The map-scheme of roads which are situated near the mouth of a debris flow hazardous rivers, Sakhalin Island. The numbers indicate: 1 – highways of federal significance; 2 – roads of regional importance; 3 – local roads; 4 - railways; 5 – sections where roads are located in the estuarine parts of mudflows.

Наибольшие объемы выноса селевого материала на участках автомобильных и железных дорог отмечены на побережье залива Терпения в Макаровском районе (в среднем 1,25 тыс. м^3 на погонный километр пляжа в год) и на западном побережье южной части острова Сахалин в Холмском и Невельском районах, где объемы селевых выносов колеблются от 0,1 до 1 тыс. м^3 на погонный километр пляжа в год [Казакова, Боброва, 2013].

На побережье острова сходят грязевые, грязекаменные и наносоводные сели. При выходе в береговую зону селевой поток распластывается. Ширина зоны аккумуляции селевых отложений составляет 20-500 м при средней толщине 1-2 м и максимальной – 3,5-4,0 м [Казакова, Боброва, 2013].

В прибрежных селевых бассейнах наблюдается высокая частота селеобразования. Сели формируются здесь 1 раз в 1-3 года; каждые 3-5 лет отмечаются периоды массового селеобразования продолжительностью от 1 до 3-5 суток, во время которых селевые потоки формируются в большинстве бассейнов [Казаков, 2000]. Грязекаменные селевые потоки, выносящие материал в береговую зону, формируются несколько реже – 1 раз в 5-7 лет [Казаков, Генсиоровский, 2008].

Отдельно необходимо отметить формирование склоновых селей на морских террасах острова Сахалин. Участки, на которых развиты склоновые сели, широко распространены на острове [Рыбальченко, 2013a; Рыбальченко, Верховов, 2017]. В некоторых районах количество таких селевых бассейнов на погонный километр берега достигает 40. В них формируются в основном связные сели, имеющие небольшие объемы (до 500 м^3) и высокую повторяемость, также они характеризуются большими уклонами (700-1000‰), что обусловливает короткое время добегания селя до расположенной в нижней части зоны транзита дороги.

Еще бóльшую проблему, чем на транспортных магистралях, селевые потоки представляют на территориях приморских населенных пунктов острова Сахалин. Здесь необходимо отметить, что, исключая селевые потоки большого объема редкой повторяемости (например, на реке Рогатка в городе Южно-Сахалинск), на острове наиболее подвержены воздействию селей именно приморские населенные пункты, где застройка занимает нижнюю часть зоны транзита и зону аккумуляции селей [Рыбальченко, 2013b].

Так, город Невельск характеризуется высокой степенью площадной пораженности территории селевыми процессами. На протяжении только вдольбереговой части города (без участков, расположенных в долинах рек Казачка и Лопатинка) насчитывается 17 селевых ручьев, впадающих в море, а также 12 склоновых селевых бассейнов, сформированных на уступах морских террас (протяженность города вдоль берега моря составляет около 11 км).

На территории города русла многих селевых ручьев зарегулированы в узкий и неглубокий бетонный лоток, который не только не может служить селепропускным каналом, но даже не справляется с объемом воды во время паводков. Пример такого ручья показан на рисунке 2. Последний селевой поток сошел здесь в июле 2010 года. Сель вышел за пределы бетонного лотка и завалил прилегающую к ручью территорию. Объем селя составил 600 м^3. Длина селевого русла составляет всего 2,3 км, средневзвешенный уклон – 116‰, а площадь бассейна – 1,3 км^2. Рассчитанный авторами для этого ручья расход воды 1% обеспеченности составляет 8,5 м^3/с, 0,1% обеспеченности – 11,8 м^3/с, а суточный объем стока – 204 м^3.



a b

Рисунок 2. Селевой ручей в городе Невельск (2010 г.): зарегулированное русло ручья после схода селя (a) и селевые отложения за пределами бетонного лотка (b)

Figure 2. Debris flow channel in the city of Nevelsk, 2010: regulated riverbed after the debris flow (a) and debris flow deposits (b)

Таким образом, разнообразие проявлений селевых процессов в совокупности с ролью селевых отложений в формировании пляжей делают задачу строительства селезащитных сооружений на острове Сахалин сложной, требующей детального анализа характеристик селей на каждом селеопасном участке. В настоящее время практически все селезащитные сооружения, расположенные в приустьевой зоне, не выполняют свою роль.

Селепропускные сооружения в приустьевой части селевых водотоков на побережье острова Сахалин

В одном и том же водосборном бассейне объемы селевых потоков значительно превышают объемы воды, проходящие во время паводков, также селевые потоки участвуют в переформировании русла, изменении его направления [Флейшман, 1978]. Кроме того, в результате ударного воздействия селевого потока на инженерные сооружения происходит их повреждение и разрушение. Эти обстоятельства необходимо учитывать при строительстве селепропускных сооружений.

Все водо- и селепропускные сооружения, расположенные в приустьевой части селеносных водотоков острова Сахалин, можно разделить на три группы.

Селепропускные сооружения

В настоящее время селепропускные сооружения спроектированы и построены лишь на участке протяженностью 7,5 км на территории Макаровского района (189-197 км автодороги Южно-Сахалинск – Оха), где опасность представляют сели из 17 селевых бассейнов [Боброва, 2012] (рисунок 3).

Мостовые переходы

Спроектированные мостовые переходы иногда способны выполнять роль селепропусков. Однако в береговой зоне острова Сахалин большая часть мостовых переходов не всегда справляется даже с объемами воды во время паводков из-за малой площади поперечного сечения мостового отверстия.

Железнодорожный мост на рисунке 3с чаще всего выполняет роль селепропуска при прохождении селей небольших объемов, однако при возможном прохождении крупных грязекаменных селевых потоков боковые пролеты моста забьются селевым материалом, площадь поперечного сечения пролетной части сузится, соответственно, давление селевого потока на мост увеличится, что приведет к повреждению и разрушению полотна железной дороги.

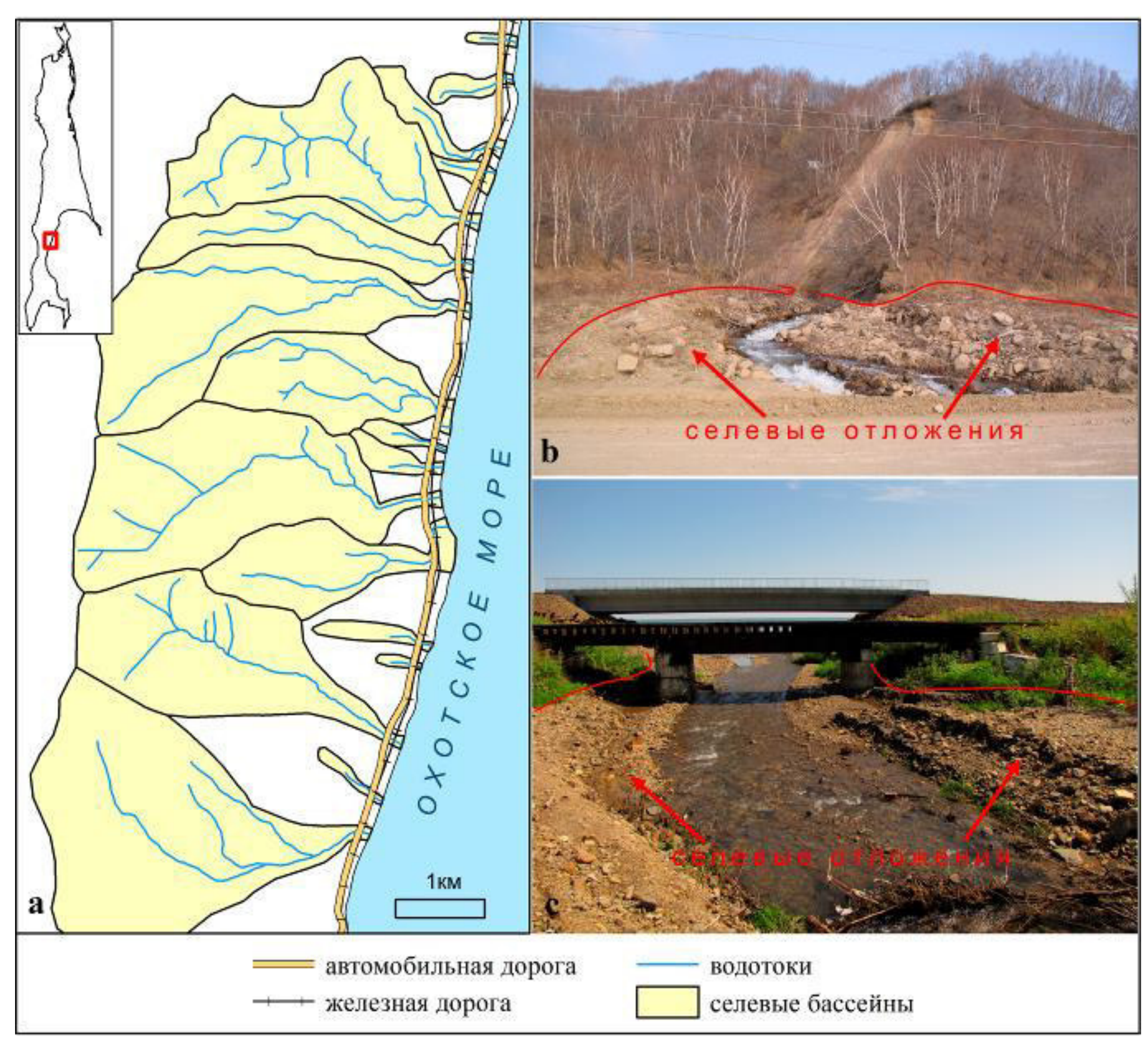


Рисунок 3. Схема селевых бассейнов восточного побережья острова Сахалин (a), селевые отложения (b), мостовой переход железной дороги (на переднем плане) и селепропускное сооружение под автомобильной дорогой (на заднем плане) на реке Жаровка (Макаровский район) (c)

Figure 3. Scheme of debris flow basins of the east coast of Sakhalin Island (a), debris flow deposits (b), the railway bridge (in the foreground) and the pass-through structure under the highway (in the background) on the river Zharovka (Makarovsky district) (c)

Водопропускные трубы

Чаще всего в качестве водопропускных сооружений на ручьях используются железобетонные трубы различного сечения (от 30 до 100 см в диаметре). Естественно, эти сооружения не могут пропустить не только сель, но даже водный поток во время паводка. Трубы быстро заиливаются, забиваются и перестают выполнять свою функцию. В результате на большей части прибрежных транспортных магистралей острова селевые потоки блокируются дорожным полотном.

На рисунке 4 приведены примеры водопропускных сооружений в прибрежной зоне острова. Водопропуски забиты селевым материалом, на дорогах видны следы селевых отложений, часть отложений расположена в пляжевой зоне.



Рисунок 4. Водопропускные трубы на селеносных ручьях: восточное побережье Южного Сахалина, Макаровский район (a и b), и западное побережье Южного Сахалина, Невельский район (c и d)
Figure 4. Culverts on the debris flow rivers of Sakhalin Island: the Eastern coast of Southern Sakhalin, Makarov district (a and b), and the Western coast of Southern Sakhalin, Nevelsky district (c and d)

Вынос крупноглыбового материала, благодаря которому осуществляется частичное гашение волн, что в свою очередь способствует защите пляжей острова, чаще всего блокируется дорожной насыпью. На участке дороги в приустьевой части водотоков, где осуществляется вынос большого объема селевого материала с крупноглыбовой составляющей, лучшим вариантом противоселевой защиты являются селепропускные сооружения.

Обоснование выбора селезащитного сооружения в приустьевой части селевых водотоков

Строительство селезащитных сооружений в приустьевой части селевых водотоков должно быть обусловлено следующими факторами:

- количеством селевых бассейнов на погонный километр;
- объемом селевых отложений;
- частотой формирования селевых потоков;
- типом селевых потоков;
- расположением в приустьевой зоне участков береговой линии, где осуществляется вынос селевого материала.

Как уже было сказано выше, на острове Сахалин в приустьевой зоне практически повсеместно осуществляется вынос селевого материала на пляж. Помимо этого, в некоторых районах острова (Макаровский район, ряд участков в Холмском и Невельском районах), формируются сели больших объемов с выносом крупноглыбового материала. На таких участках

целесообразно возведение мостовых переходов, выполняющих роль селепропусков.

На участках распространения склоновых селевых бассейнов, с их количеством 30-40 шт/км (участок с. Шебунино – с. Горнозаводск, Невельский район), где формируются сели небольшого объема (до 500 м^3), характеризующиеся высокой повторяемостью (3-5 раза в год), на взгляд авторов, целесообразно строительство селевых ловушек.

В качестве сравнительного анализа характеристик склоновых селевых потоков и четырех временных водотоков, по руслам которых в 2015 г. сошли склоновые сели, были рассчитаны расходы воды редкой повторяемости (0,1% обеспеченности), а также объемы стока и объемы селевых отложений (таблица 1). Бассейны № 1 и № 2 показаны на рисунке 5. Несмотря на небольшие объемы, такие сели регулярно достигают полотна автомобильных и железных дорог, проложенных непосредственно у подножия уступов морских террас (рисунок 5).

В настоящее время на отдельных участках побережий острова не существует никакой защиты от селевых потоков, поэтому несколько раз в год дорогу перекрывают отложения склоновых селей.

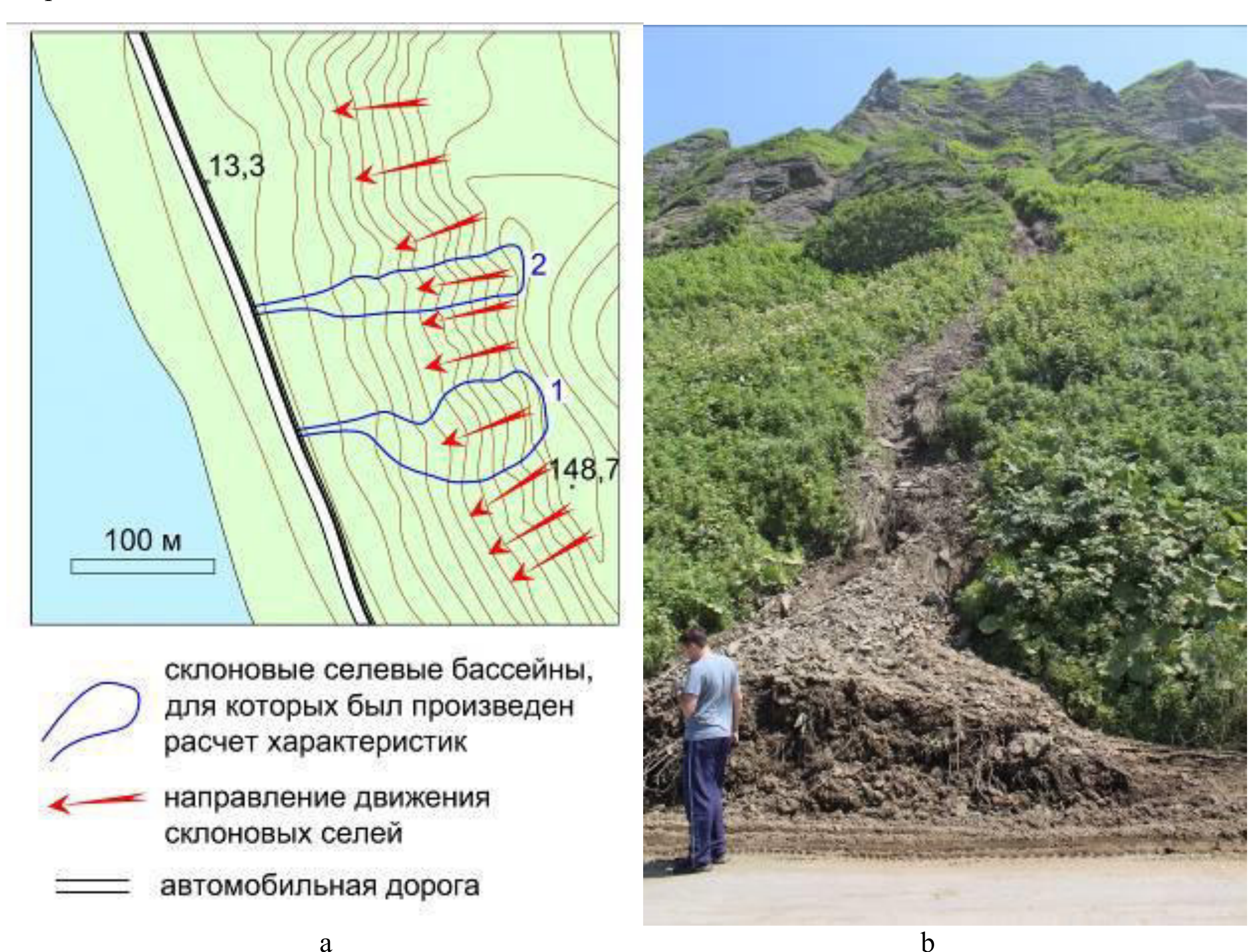


Рисунок 5. Склоновые сели на морских террасах западного побережья Южного Сахалина: схема расположения склоновых селевых бассейнов (a) и отложения склонового селевого потока, завалившего автодорогу с. Шебунино – с. Горнозаводск (Невельский район) в июле 2015 г. (b)
Figure 5. Slope debris flows on the western coast of South Sakhalin: scheme of slope debris flow basins (a) and deposits of slope debris flow on the road Shebunino – Gornozavodsk (Nevelskiy district) in July 2015(b)

Таблица 1. Характеристики склоновых селевых бассейнов на западном побережье Южного Сахалина
Table 1. Characteristics of slope debris flow basins on the western coast of South Sakhalin

№	Средневзвешенный уклон русла, ‰	Длина водотока, м	Площадь бассейна, тыс. м^2	Расход воды, м^3/с, 0,1% обеспеченности	Объем стока за сутки, м^3	Объем селевых отложений, м^3 (единовременный вынос, 2015 г.)
1	703	170	6	0,010	0,168	40
2	668	180	4,5	0,009	0,144	40
3	1004	120	2,4	0,003	0,072	10
4	986	130	1,9	0,003	0,072	50

Заключение

Суммарная протяженность автомобильных и железных дорог, расположенных в приустьевых частях селевых водотоков, на острове Сахалин составляет около 300 км, а специально спроектированные селепропускные устройства, полностью выполняющие свою функцию, построены только на участке протяженностью 7,5 км.

В ряде случаев роль селепропусков выполняют мостовые переходы, имеющие достаточные площади поперечного сечения подмостового отверстия. Большинство из существующих в настоящее время водопропускных устройств под дорогами выполнять роль селепропусков не способны. Кроме того, в результате забивания отверстий труб и мостов селевыми отложениями последние перестают выполнять свою водопропускную функцию. Поэтому необходимо проектирование новых сооружений, способных обеспечивать прохождение не только воды, но и селевых потоков.

Для того чтобы одновременно избежать повреждения дорожного полотна селевыми потоками и не препятствовать поставке селевого материала в пляжевую зону, под транспортными магистралями необходимо строить селепропуски; вынесенный в береговую зону селевой материал, аккумулируясь, увеличивает мощность пляжа, защищая проходящие по берегу моря автомобильные и железные дороги от волновых воздействий. Основным критерием для выбора селепропускного сооружения в качестве защиты от селей являются следующие характеристики селей: объемы (более 500 м^3), наличие крупноглыбового материала, вынос селевого материала на пляж.

Для выбора сооружений селевой защиты в береговой зоне острова Сахалин необходимо отталкиваться от таких факторов, как объем и частота выноса селевых отложений в пляжевую зону, площадная пораженность селевыми процессами, тип селя (склоновый или долинный), частота формирования, объем селевых отложений, дальность выброса селя.

На некоторых участках из-за малых объемов селевых отложений достаточно сооружения широкой укрепленной канавы, выполняющей роль селевой ловушки.

Литература

Боброва Д.А. Инженерные мероприятия по защите линейных сооружений от селей на о. Сахалин // Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», посвященной 100-летию С.М. Флейшмана (г. Москва, 17-19 октября 2012 года) / Отв. ред.

References

Bobrova D.A. Inzhenernye meropriyatiya po zashchite lineinykh sooruzhenii ot selei na o. Sakhalin [Engineering actions for protection of linear constructions from debris flow on the Sakhalin Island]. *Trudy Vtoroi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita», posvyashchennoi 100-letiyu S.M. Fleishmana (g. Moskva,*

С.С. Черноморец. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 13-14.

Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин). Дисс. … канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 2000. 216 с.

Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Грязекаменные сели катастрофических объемов в низкогорье острова Сахалин // Труды Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (г. Пятигорск, 22-29 сентября 2008 г.) / Отв. ред. С.С. Черноморец. Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 2008. С. 45-48.

Казакова Е.Н., Боброва Д.А. Роль селевых потоков в формировании пляжей Южного Сахалина // Георисk. 2013. № 3. С. 34-39.

Олиферов А.Н. Селевые потоки в Крыму и Карпатах. Симферополь: Доля, 2007. 176 с.

Перов В.Ф. Селеведение: учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Том 18. Дальний Восток. Выпуск 4. Сахалин и Курилы / Под ред. М.Г. Васьковского. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 262 с.

Рыбальченко С.В. Селевые процессы на склонах морских террас южного Сахалина // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013a. № 3(169). С. 52–59.

Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населенных пунктов Сахалинской области // Георисk. 2013b. № 3. С. 40-44.

Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности // Георисk. 2017. № 4. С. 58-63.

Флейшман С.М. Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 312 с.

Faccini F., Piccazzo M., Robbiano A. Natural hazards in San Fruttuoso of Camogli (Portofino Park, Italy): a case study of a debris flow in a coastal environment // Italian Journal of Geosciences. 2009.

17-19 oktyabrya 2012 goda) [Proceedings of the Second Conference «Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection» dedicated to 100th anniversary of S.M. Fleishman (Moscow, October 17-19, 2012)]. Moscow, Publ. Geograficheskii fakul'tet MSU, 2012, pp. 13-14. (In Russian).

Faccini F., Piccazzo M., Robbiano A. Natural hazards in San Fruttuoso of Camogli (Portofino Park, Italy): a case study of a debris flow in a coastal environment. *Italian Journal of Geosciences*, 2009, vol. 128, no. 3, pp. 641-654. DOI: 10.3301/IJG.2009.128.3.641

Fleishman S.M. *Seli. [Debris flow].* Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Kazakov N.A. *Geologicheskie i landshaftnye kriterii ocenki lavinnoj i selevoj opasnosti pri stroitel'stve linejnyh sooruzhenij (na primere o. Sahalin). Diss. kand. geol.-min. nauk. [Geological and landscape criteria for assessing avalanche and debris flow hazard during the construction of linear structures (on the example of Sakhalin Island). Ph. D. (Geological and mineralogical sciences) Thesis].* Moscow, 2000. 216 p. (In Russian).

Kazakov N.A., Gensiorovskiy Y.V. Gryazekamennye seli katastroficheskikh ob"emov v nizkogor'e ostrova Sakhalin [The debris flows of catastrophic volume in low mountains of Sakhalin Island]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita» (g. Pyatigorsk, 22-29 sentyabrya 2008 g.) [Proccedings of the International Conference "Debris flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Pyatigorsk, September 22-29, 2008)],* Pyatigorsk: Publ. Sevkavgiprovodkhoz Institute, 2008, pp. 45-48. (In Russian).

Kazakova E.N., Bobrova D.A. Rol' selevykh potokov v formirovanii plyazhei Yuzhnogo Sakhalina [The role of debris-flow processes in formation of beaches of the Southern Sakhalin]. *Georisk [Georisk],* 2013, no. 3, pp. 34-39. (In Russian; abstract in English).

Oliferov A.N. *Selevye potoki v Krymu i Karpatakh [Mudflows in the Crimea and the Carpathians].* Simferopol', Publ. Dolya, 2007. 176 p. (In Russian).

Vol. 128. No. 3. P. 641-654. DOI: 10.3301/IJG.2009.128.3.641

Perov V.F. *Selevedenie: uchebnoe posobie*. Moscow, Moscow University Press, 2012. 272 p. (In Russian).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 vol. Tom 18. Dal'nii Vostok. Vypusk 4. Sakhalin i Kurily. [Surface water resources of the USSR: in 20 volumes. Volume 18. The Far East. Issue 4. Sakhalin and the Kuril Islands]. Vas'kovskii M.G. (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1973. 262 p. (In Russian).

Rybalchenko S.V. Selevye protsessy na sklonakh morskikh terras yuzhnogo Sakhalina [Mudflow processes on slopes of the marine terraces of South Sakhalin]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences]*, 2013a, no. 3(169), pp. 52–59. (In Russian).

Rybalchenko S.V. Selevaya opasnost' dlya naselennykh punktov Sakhalinskoi oblasti [Mudflow hazard for the Sakhalin Region settlements]. *Georisk [Georisk]*, 2013b, no. 3, pp. 40-44. (In Russian; abstract in English).

Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V. Sklonovye selevye basseiny i ikh morfodinamicheskie osobennosti [Slope debris flow basins and their morphodynamic features]. *Georisk [Georisk],* 2017, no. 4, pp. 58-63, 78. (In Russian; abstract in English).

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ
ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE

УДК 504.42
DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.19

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНОГЕНЕЗ МИРОВОГО ОКЕАНА: ХАРАКТЕР ПРОЦЕССОВ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

А.Л. Суздалева[1], В.Н. Безносов[2]
[1]Национальный исследовательский «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия; [2]ООО «Альфамед 2000», г. Москва, Россия
SuzdalevaAL@yandex.ru

MODERN TECHNOGENESIS OF THE WORLD OCEAN: NATURE OF PROCESSES AND ECOLOGICAL PROBLEMS

Antonina L. Suzdaleva[1], Victor N. Beznosov[2]
[1]National Research University «Moscow State University of Civil Engineering», Moscow, Russia; [2]LLC «Alfamed 2000», Moscow, Russia
SuzdalevaAL@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время человеческая деятельность постепенно охватывает весь объем Мирового океана, включая его центральные части и глубинные слои. Состояние Мирового океана всегда являлось важнейшим фактором, определявшим условия существования всей биосферы. По этой причине изменение его гидрологической структуры и свойств в прошедшие геологические эпохи неоднократно приводило к глобальным экологическим кризисам и вымиранию большинства существовавших в то время организмов. Современный техногенез Мирового океана может иметь аналогичные катастрофические последствия. Развитие этого кризиса будет скачкообразным. На его первом этапе последствия техногенной трансформации локализованы в границах отдельных участков акватории Мирового океана. Но их количество непрерывно возрастает. В определенный момент времени совокупный эффект этого процесса в течение относительно короткого времени может вызвать разрушение Мирового океана как единой системы, перехода ее в новое состояние. Это неизбежно приведет к нарушению условий на большинстве участков планеты, вызовет глобальный экологический и социально-экономический кризис. Вместе с тем остановить процесс техногенеза Мирового океана в условиях непрерывного роста народонаселения Земли и его потребности в природных ресурсах

Abstract. The condition of the World Ocean has always been the most important factor living conditions of all Biosphere. For this reason change of its hydrological structure and properties during past geological eras repeatedly led to global ecological crises and extinction of the majority of the organisms existing at that time. The modern technogenesis of the World Ocean can have similar catastrophic consequences. The development of this crisis will take place in a hopping manner. At its first stage, the consequences of technogenic transformation are localized within the boundaries of individual sections of the World Ocean. But their number is constantly increasing. At a certain point in time, the cumulative effect of this process for a relatively short time can cause the destruction of the World Ocean as a single system, and its transition to a new state. This will inevitably disrupt conditions in most parts of the planet, and will cause a global ecological and socio-economic crisis. At the same time, it is impossible to stop the process of technogenesis of the World Ocean under the conditions of continuous growth of the Earth's population and its need for natural resources. The only real way to prevent catastrophic consequences is to develop mechanisms for controlling the processes of technogenesis. In practice, this problem can be solved by creating managed natural-technical systems. In these systems, enabling ecological conditions and

Суздалева А.Л., Безносов В.Н. Современный техногенез мирового океана: характер процессов и экологические проблемы // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 1. С. 19-31. DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.19

невозможно. Единственным реальным путем предотвращения катастрофических последствий является разработка механизмов управления процессами техногенеза. На практике эта задача может быть решена на основе создания управляемых природно-технических систем. В этих системах благоприятные экологические условия и сохранение биоразнообразия обеспечиваются работой технических объектов – экологических регуляторов. В качестве них могут использоваться технические системы и сооружения, создаваемые для других целей (искусственные острова, морские электростанции и др.). Мировой океан является достоянием всего человечества, но его прибрежные акватории и острова принадлежат отдельным государствам. По этим причинам управление техногенезом Мирового океана обусловливает необходимость развития специального направления в сфере международного права, консолидации усилий различных стран по комплексному решению экологических, экономических и геополитических проблем.

biodiversity conservation are ensured by the operation of technical facilities - ecological regulators.

Ключевые слова: техногенез; Мировой океан; природно-техническая система; экологический регулятор; креативная парадигма решения экологических проблем; искусственные острова

Keywords: technogenesis; World Ocean; natural-technical system; ecological regulator; creative paradigm of solving ecological problems, artificial islands.

Введение

Техногенез Мирового океана, т.е. техногенная трансформация его структуры и свойств, носит многоплановый характер, что обусловливает мультидисциплинарный характер изучения данной проблемы. Ее различные аспекты являются предметом изучения экологии, гидрологии, гидрохимии, метеорологии и ряда других научных дисциплин. Несмотря на различия предметов исследования, большинству этих исследований свойственны три общие черты. Во-первых, основное внимание специалистов уделяется отдельным феноменам, рассмотрение которых абстрагируются от других проблем. Например, изучение процесса загрязнения моря обычно ограничивается поступлением в воду веществ или тепловой энергии с различных техногенных объектов, вызывающих нежелательные изменения химического состав или температурного режима вод. В то же время изменение физико-химических свойств водной среды, возникающее в результате нарушения стратификации морской среды человеческой деятельностью, как одна из форм загрязнения не рассматривается. Вместе с тем подобное «дестратификационное загрязнение» [Безносов, 2000а] может представлять не меньшую экологическую опасность. Например, техногенный подъем глубинных вод с высокой концентрацией сероводорода может вызвать гибель организмов в поверхностных слоях моря.

Suzdaleva A.L., Beznosov V.N. Modern technogenesis of the world ocean: nature of processes and ecological problems. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 19-31. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.19

Во-вторых, проявления техногенеза начинают всесторонне анализировать и изучать лишь после того, как они принимают выраженный негативный характер. Главная же задача научной деятельности заключается не в объяснении причин уже произошедшего, а в прогнозировании будущих событий и в своевременной разработке мер, позволяющих избежать их негативных последствий. Так, на современном этапе происходит искусственное изменение конфигурации берегов различных морей и их подводного рельефа. Вопрос о том, на каком этапе этот процесс сможет оказать значимое влияние на характер циркуляции вод и вызвать изменение мезо- и макроклимата, практически не изучается.

В-третьих, при выработке мер по предотвращению и снижению негативных последствий техногенеза специалисты, как правило, не выходят за рамки устоявшейся запретительно-ограничительной парадигмы, согласно которой решение экологических и иных проблем, обусловленных трансформацией окружающей среды, заключается в усилении контроля отдельных «потенциально опасных» видов человеческой деятельности. Но в условиях непрерывного роста народонаселения и постоянного появления новых видов деятельности, связанных с освоением ресурсов Мирового океана, подобный подход может дать лишь временные локальные результаты. Остановить процесс техногенеза Мирового океана, как и биосферы в целом, запретительными мерами невозможно [Суздалева, Горюнова, 2017]. Единственный реальный путь решения проблемы заключается в создании механизмов управления этим процессом. Подобный методологический подход, который можно назвать креативной парадигмой, противоречит основному стереотипу «экологического мышления», отрицающему возможность активного вмешательства человека в природные процессы. По этой причине целью данной работы являлся не только обобщающий анализ различных аспектов техногенеза Мирового океана, но и обоснование необходимости принципиального пересмотра взгляда на возможные пути предотвращения катастрофических последствий этих процессов.

Методологические принципы исследования

При сборе и анализе информации, характеризующей процессы техногенеза Мирового океана, мы руководствовались следующими принципами:

1. В число возможных направлений техногенеза включались не только проекты, в настоящее время представляющие собой реальную угрозу крупномасштабного техногенного воздействия на Мировой океан, но и выдвигавшиеся в прошлом идеи, воплощение которых способно вызвать аналогичный результат. Как показывает исторический опыт любая ранее отвергнутая идея в изменившихся условиях может быть реализована.
2. Техногенная трансформация Мирового океана одновременно происходит по нескольким направлениям, которые мы рассматриваем как отдельные виды техногенеза – геоморфологический, гидрологический, гидрохимический и биотический [Суздалева, Горюнова, 2014]. Но следует помнить, что развитие этих явлений происходит не обособлено, а в сложной взаимосвязи.
3. Неконтролируемый техногенез Мирового океана вызывает изменение условий практически на всей поверхности планеты, включая территории континентов. Это неизбежно стимулирует развитие глобальных геоэкологических кризисов (продовольственного, водопотребления и др.) [Суздалева, 2019]. В основе всех этих явлений лежит изменение экологической ситуации, влекущее за собой нарушение условий жизнедеятельности населения обширных регионов.
4. Результатом техногенеза во всех случаях является возникновение природно-технической системы, т.е. совокупности взаимодействующих объектов естественного и искусственного происхождения [Суздалева, 2016]. Существует две основные категории подобных систем. К первой относятся неуправляемые природно-технические системы. Они возникают спонтанно,

и их существование, как правило, сопровождается экологической деградацией окружающей среды. Вторая категория – это управляемые природно-технические системы. Условия в них определяются работой экологического регулятора, в качестве которого могут выступать различные устройства, инженерные системы и сооружения, режимы работы и конструкции которых соответствующим образом скорректированы. Для выполнения этой задачи необходимо развитие междисциплинарного научно-технического сотрудничества. Его важнейшим условием является синкретический подход к осмыслению целей и путей решения проблем. В данном случае это частичное восприятие различными группами специалистов точки зрения своих идейных противников. Специалистам-экологам необходимо пересмотреть отношение к техногенезу окружающей среды как к сугубо негативному явлению. Специалисты инженерно-технической сферы должны воспринимать задачу улучшения экологической ситуации не как формальное природоохранное ограничение, а как важнейший конечный результат своей деятельности – целенаправленное улучшение условий окружающей среды.

5. Происходящие глобальные климатические изменения (парниковый эффект) и вызываемые ими изменения Мирового океана не рассматриваются в статье как процессы техногенеза. Экологическая значимость этих явлений несомненна. Но трактовать их как процессы сугубо техногенного характера преждевременно. Многие специалисты придерживаются мнения, что основную роль в происходящих глобальных климатических процессах играют естественные факторы. Вместе с тем характер последствий техногенеза во многом зависит от хода глобальных климатических процессов и, напротив, техногенная трансформация Мирового океана может как усиливать, так и снижать развитие парникового эффекта.

Виды техногенеза Мирового океана

Техногенез Мирового океана – это процесс, являющийся результатом прямого и косвенного воздействия на гидросферу весьма широкого спектра видов человеческой деятельности. Для анализа последствий развития экологической ситуации эти воздействия необходимо классифицировать, выделив несколько основных категорий, рассмотренных далее.

Геоморфологический техногенез

Геоморфологический техногенез заключается в изменении конфигурации и структуры береговой линии, а также подводного рельефа. Деятельность, приводящая к подобным результатам, преследует различные цели. Так, в ряде стран разрабатываются и осуществляются многочисленные проекты: от размещения нефтяных платформ до строительства искусственных земельных участков и искусственных островов, уничтожающих значительные участки шельфовой зоны. Их предназначение весьма различно: организация добычи полезных ископаемых на шельфе, размещение аэродромов, производственных объектов, жилых массивов и пр. По прогнозам к 2030 году до 12,5 млн. км^2 морских акваторий будут заменены искусственными территориями [Chee et al., 2017].

В подавляющем большинстве случаев возведение искусственных островов сопровождается загрязнением окружающей среды, изменением гидрологического режима, а также ликвидацией и коренной трансформацией морских биотопов [Givi et al., 2015]. Если строительство искусственных земельных участков и островов будет происходить теми же темпами, что и в настоящее время, то в определенный момент это может привести к изменению соотношения площади суши и Мирового океана, с соответствующими изменениями мезо- и макроклимата, а также условий существования экосистем и жизнедеятельности населения на многих участках планеты, в т.ч. удаленных от моря.

В обозримом будущем можно прогнозировать и рост масштабов техногенной

трансформации рельефа дна Мирового океана. Прежде всего, это связано с реализацией различных планов освоения морских месторождений полезных ископаемых. Подводный рельеф является важным фактором формирования морских течений, и, следовательно, его изменение также способно оказать значимое воздействие на климат многих участков планеты. Данная проблема усугубляется тем, что при разработке морских месторождений восстановление подводного рельефа в настоящее время представляет собой невыполнимую задачу.

Геоморфологический техногенез Мирового океана может быть обусловлен не только целенаправленной деятельностью, но и процессами, косвенно спровоцированными человеком. Их примером служит увеличение твердого речного стока, сопутствующее урбанизации все новых территорий и расширению зон их интенсивного хозяйственного освоения. Поступление дополнительного количества взвеси в моря проявляется не только в интенсификации отложения наносов в приустьевых акваториях. Уже высказываются опасения значительного увеличения осадочной толщи в центральных частях морских бассейнов, в масштабах способных вызвать катастрофическое повышение уровня Мирового океана [Гулин, 2015].

Вместе с тем создание искусственных островов и земельных участков, а также сооружение карьеров на морском дне открывает широкие возможности для формирования крупномасштабных управляемых природно-технических систем, в которых функции экологических регуляторов будут выполнять возводимые объекты. Так, изменение конфигурации береговой линии и подводного рельефа может интенсифицировать процессы самоочищения морской среды, улучшить экологические условия на прибрежных территориях.

Гидрологический техногенез

Гидрологический техногенез включает всю совокупность процессов техногенной трансформации структуры и динамики слагающих Мировой океан водных масс, а также их термического режима. Эти процессы могут осуществляться как в форме целенаправленных усилий, так и являться побочными эффектами реализации различных проектов. В первом случае возникают потенциально управляемые природно-технические системы, в качестве экологического регулятора которых можно использовать возводимые гидротехнические сооружения (плотины, устройства для вертикального перемещения вод и др.). Во втором случае неизбежно формируются неуправляемые природно-технические системы, для превращения которых в управляемые требуется создание экологических регуляторов.

Деятельность, результатом которой может стать техногенная трансформация морских течений весьма разнообразна. Воздействие на *горизонтально направленные морские течения* может оказывать возведение искусственных островов, создающих преграду на пути распространения вод, и использование движения водных масс для выработки электроэнергии. Гидроэнергетический потенциал морских течений огромен [Alcérreca-Huerta et al., 2019]. Гипотетически только его использование может дать более 100 млн. кВт электроэнергии. В настоящее время в данной области уже разработан ряд проектов. Наиболее близким к реализации проектом является строительство подобной электростанции в районе Бермудских островов. Аналогичные проекты существуют для Флоридского и Гибралтарского проливов, восточного побережья Японии (течение Куросио).

Виды деятельности, сопровождающиеся *нарушением вертикальной структуры водных масс* (нарушением стратификации), более разнообразны. Но практически все формы искусственных апвеллингов и даунвеллингов вызывают значимое изменение условий в морской среде [Безносов, 2000а]. Основное значение в сфере техногенных нарушений стратификации моря имеет подъем глубинных вод к поверхности. Он также может осуществляться как целенаправленно, так и возникать в форме побочного эффекта деятельности. К первому случаю относятся

различные системы, так называемого, «искусственного апвеллинга», использующие богатые биогенами глубинные воды для повышения продуктивности хозяйств морской аквакультуры. В современном мире данная деятельность получает все большее распространение и масштабы [Lin et al., 2019]. В значительно больших объемах целенаправленный подъем глубинных вод осуществляется в так называемых океанских термальных электростанциях [Liu, 2018]. Помимо производства электроэнергии некоторые проекты предусматривают использование этих объектов в качестве промышленных опреснителей, а отработанные богатые биогенами глубинные воды могут быть использованы для развития марикультуры. Крупномасштабный подъем вод из глубинных слоев все шире используется в системах технического водоснабжения различных промышленных и энергетических объектов. Более низкая температура глубинных вод значительно повышает эффективность их работы. При этом объем поднимаемых вод достаточно велик. Например, расход вод на современных АЭС сравним со стоком некоторых рек.

Во вторую категорию входит деятельность, при которой подъем глубинных вод является побочным эффектом. Например, он наблюдается при возведении в море различных гидротехнических сооружений, добыче полезных ископаемых, прокладке кабелей и трубопроводов, строительстве подводных тоннелей и осуществлении подводных взрывных работ [Безносов, 2000а].

Проекты корректировки *термического режима* морских акваторий в прошлом неоднократно разрабатывались с целью улучшения регионального климата и условий хозяйственной деятельности. Так, еще в 30-е годы XX века для повышения температуры поверхностных вод Карского моря – с целью улучшения функционирования «Северного морского пути» – предлагалось перенаправить р. Обь в Байдарацкую губу. Другой предложенный в те же годы план предусматривал перенаправление стока р. Амур в Охотское море. По расчетам его авторов это привело бы к повышению температуры поверхностных вод на огромной акватории вплоть до Чукотки. Подобные идеи высказываются и в настоящее время. Так, в 2013 г. вопрос о переносе устья р. Амур вновь обсуждался на заседаниях думы г. Владивостока и на специально организованных по данному поводу конференциях. В качестве главной цели рассматривалось улучшение климата на побережье Приморского края для повышения его привлекательности как курортной зоны. Периодически выдвигаются и другие идеи в этой области, например, постройка плотины в Беринговом проливе, через которую более теплые воды Тихого океана будут в больших объемах перекачиваться в Северный Ледовитый океан. Возникшее искусственное теплое морское течение должно вызвать таяние полярных льдов, что вызовет благотворное (по мнению сторонников данной идеи) потепление климата во всем Северном полушарии.

Итак, все эти проекты имеют одну общую черту. Они обосновываются как возможность оптимизации климатических условий, способствующих развитию конкретных направлений человеческой деятельности (улучшения условий мореплавания, повышения рекреационного потенциала прибрежных территорий и др.). Другие же последствия техногенеза игнорируются, хотя при реализации этих проектов они, вероятно, были бы катастрофичными. Так, увеличение притока речных вод в Карское море в объеме, способном вызвать значимое изменение его ледового режима, неизбежно сопровождалось бы снижением солености вод до уровня, вызывающего гибель подавляющего большинства обитающих в нем организмов.

Рассматривая проблемы гидрологического техногенеза следует обратить внимание на то, что в настоящее время человеческая деятельность в данном плане проявляется почти исключительно в шельфовой зоне. Но с достаточным основанием можно предположить, что уже в ближайшем будущем гидрологическому техногенезу начнут подвергаться акватории, все более и более удаленные от берегов.

Химический и биогеохимический техногенез

Химический техногенез заключается в изменении химического состава вод Мирового океана под воздействием человеческой деятельности. Как уже указывалось выше, некоторые ранее выдвигавшиеся проекты в случае их реализации привели бы к опреснению значительных акваторий. Обратные по своему характеру явления, заключающиеся в повышении солености морских вод, наблюдаются при сокращении речного стока во внутренние моря [Виноградов, 1987; Xu et al., 2019]. Локальное повышение солености может быть обусловлено работой промышленных опреснителей, количество и мощность которых неуклонно возрастает, как и объемы сбрасываемых ими в море отработанных рассолов.

Выдвигались и идеи целенаправленного изменения химического состава вод. Так, в СССР разрабатывались проекты внесения удобрений в халистатические зоны Мирового океана с целью повышения их биопродуктивности и даже проводились натурные эксперименты [Кабанова, Доманов, 1985].

Все эти проекты можно рассматривать как попытки создания потенциально управляемых природно-технических систем. Однако наиболее значимым аспектом химического техногенеза является загрязнение морских вод, приводящее к возникновению на обширных акваториях неуправляемых, деградирующих природно-технических систем. Данные процессы проявляются повсеместно, и их детальному анализу посвящено огромное количество публикуемых работ. Не останавливаясь на этих общеизвестных и широко обсуждаемых проблемах, обратим внимание на возможное развитие ситуации в будущем. На современном этапе зоны сильного загрязнения морских вод носят локальный характер. Выносимые из них устойчивые агенты загрязнения фиксируются в акваториях, удаленных на значительные расстояния. Но пока поток загрязнителей, поступающий в моря, относительно мал по отношению к объему Мирового океана. Поэтому процессы загрязнения не приводят к глобальному изменению химизма морских вод. Этому также способствуют буферные свойства морской среды, биологическое и химическое разложение загрязнителей, а также их переход в донные осадки в форме труднорастворимых соединений. Вместе с тем можно предположить, что при непрерывном росте потока загрязнителей на определенном этапе произойдет некий качественный скачок, в результате которого будут наблюдаться значимые и, в отличие от континентальных водных объектов, практически необратимые изменения состава вод во всем объеме Мирового океана. Очевидно, что в экологическом плане подобные явления будут носить катастрофический характер, поскольку химический состав внутренней среды подавляющего большинства морских организмов зависит от состава морской воды.

Еще большую опасность представляет *биогеохимический техногенез*, под которым мы понимаем техногенную трансформацию круговоротов различных химических элементов. Биогеохимические циклы обеспечивают системное единство биосферы. Изменение характера этих процессов, которое неминуемо последует за любым крупномасштабным изменением состава и структуры Мирового океана (т.е. его химическим и гидрологическим техногенезом), неизбежно скажется на всех участках биосферы, включая все пространство наземно-воздушной среды обитания. Иллюстрацией возможных экологических последствий могут служить реконструкции некоторых глобальных экологических кризисов, вызванных нарушениями углеродного цикла, причиной которых, в свою очередь, предположительно являлись крупномасштабные изменения структуры Мирового океана. Так, один из возможных сценариев глобального экологического кризиса, произошедшего в конце мелового периода, представлял собой следующую цепь событий [Безносов, 2000b]: падение крупного метеорита вызвало дестратификацию значительной части Мирового океана; в фотическую зону из придонных слоев поступило большое количество биогенных элементов, что, согласно палеонтологическим материалам, вызвало бурное цветение вод,

распространившееся на большую часть океанической акватории [Найдин и др., 1986]; обусловившие цветение массовые виды фитопланктона (кокколитофориды) имели известковый скелет; оседая по окончанию цветения, они сформировали залежи карбонатов, в т.ч. писчего мела, по которым и был назван данный геологический период. В ходе этих процессов из атмосферы было изъято огромное количество углерода. Наступившее вследствие этого глобальное похолодание сопровождалось вымиранием большей части как морской, так и наземной биоты.

Биотический техногенез

Биотический техногенез – это изменения качественного и количественного состава биоты, вызванные непосредственным воздействием техногенных факторов. Основными факторами биотического техногенеза Мирового океана являются [Суздалева, Горюнова, 2017]:

– изменение условий морской среды, делающее ее непригодной для обитания различных видов организмов;

– создание благоприятных условий для массового развития отдельных форм, становящихся новыми доминантами морских экосистем;

– техногенные биологические инвазии, т.е. переселение организмов в новые, ранее недоступные для них акватории, с помощью технических средств (например, их перевозка в трюмных и балластных водах судов) [Суздалева, Безносов, Горюнова, 2015; Sol, Weis, 2019];

– создание человеком новых биотопов, пригодных для заселения морскими организмами. Еще в 80-е годы XX века было подсчитано, что суммарная поверхность только одного из типов техногенных субстратов, вводимых в морскую среду, – подводных частей корпусов плавсредств – превышала суммарную площадь верхних сублиторалей Черного, Азовского и Каспийского морей [Резниченко, 1978].

Количество техногенных субстратов в Мировом океане постоянно возрастает, как и их роль в формировании биоты. Некоторые их виды, как, например, опускающийся на морское дно мусор, в значительном количестве достигают самых глубоких участков Мирового океана, в которых осуществление целенаправленной человеческой деятельности при современном уровне технического развития невозможно. В то же время появление в глубинах океана искусственных субстратов, изменяет структурно-функциональную организацию существующих в них пелагических и бентических сообществ. В результате, на огромных участках океанического дна возникают неуправляемые природно-технические системы, принципиально отличающиеся от ранее существовавших там естественных экосистем. Так биомасса перифитона на твердой поверхности осевшего мусора может достигать нескольких килограмм на квадратный метр [Резниченко, Солдатова, Цихон-Луканина, 1976], тогда как биомасса организмов в естественных мягких грунтах этого же участка дна измеряется в миллиграммах на квадратный метр.

Таким образом, биотический техногенез объединяет несколько различных процессов. Их совокупным результатом стало принципиальное изменение состава организмов на некоторых участках биосферы – формирование технобиоты [Суздалева, Безносов, Горюнова, 2015].

Реальные пути решения проблемы

Не вызывает сомнений, что в обозримом будущем неизбежно расширение масштабов и увеличение разнообразия форм техногенеза Мирового океана. Остановить этот процесс какими-то запретительными мерами и тем более повернуть вспять нереально. Вместе с тем можно предотвратить или минимизировать негативные последствия техногенеза Мирового океана путем превращения спонтанно возникающих неуправляемых природно-технических систем в управляемые. Очевидно, что практическое решение проблем в этой области будет не менее разнообразным, чем направления техногенной трансформации морской среды. Описать даже уже существующие наработки в данной области в рамках журнальной статьи невозможно. Поэтому мы ограничимся изложением общих принципов проектирования управляемых природно-технических систем, позволяющих выработать

единый подход к осуществлению этой деятельности, и на их основе объединить отдельные разрозненные попытки решения частных проблем в рамках крупномасштабных проектов, направленных на сохранение благоприятных экологических условий для развития всего человечества.

Создание управляемых природно-технических систем и их последующее скоординированное развитие включает ряд последовательно выполняемых этапов [Суздалева, 2016]:

1. *Выбор экологического регулятора* природно-технической системы, который может быть:

– индивидуальным (например, устройство искусственного даунвеллинга, закачивающее богатые кислородом поверхностные воды в придонную застойную зону, образовавшуюся в результате изменения рельефа морского дна);

– групповым, состоящим из нескольких функционально связанных объектов, которые могут играть роль самостоятельных экологических регуляторов или объединяться, составляя единый регулятор (например, система искусственных рифов, корректирующих гидрологический, гидрохимический и гидробиологический режим прибрежной акватории);

– комплексным, при котором управление природно-технической системой происходит в результате скорректированной работы объектов, которые между собой функционально не связаны (примером может служить совокупность искусственных островов различного предназначения, снабженных системами для очистки морских вод и изъятия из них мусора).

2. *Определение параметров* управляемой природно-технической системы – границ системы и функций, выполняемых ее регулятором. Границей системы является черта, за пределами которой регулятор не способен оказывать значимого воздействия на условия морской среды. Точно установить границы, как правило, невозможно. Во многих случаях они могут изменяться, например, под влиянием гидрометеорологических условий. Поэтому при определении границ в зону воздействия управляемых природно-технических систем следует включать только те участки, в которых регулятор с высокой долей вероятности способен:

– оперативно предотвращать развитие негативных процессов и явлений, создающих угрозу ухудшения экологических условий, т.е. выполнять природоохранную функцию;

– обеспечивать защиту от воздействия чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Эту задачу регулятора можно обозначить термином «средозащитная функция».

3. *Субъективизация элементов* управляемой природно-технической системы – установление круга юридических лиц, заинтересованных в сохранении благоприятной ситуации, обеспечиваемой работой экологического регулятора. Для их обозначения в современной научной литературе используется термин «стейкхолдеры». Ими, в частности, могут являться и правительства отдельных стран.

4. *Формирование административной структуры* управляемой природно-технической системы, т.е. установление официальных (договорных) взаимоотношений между организацией (страной), обеспечивающей работу ее регулятора, и стейкхолдерами.

5. *Координация работы* создаваемой природно-технической системы с аналогичными системами *на основе принципа «восходящего проектирования» (bottom-up approach)*. Координация заключается в постепенном иерархическом объединении относительно небольших систем в более крупные, способные на основе скоординированной работы решать более масштабные проблемы. Для этого необходимо при проектировании локальных систем предусматривать возможность их функционального объединения в региональные и межрегиональные системы. Например, различные гидротехнические сооружения, способные регулировать гидродинамический режим на ограниченном участке акватории, при скоординированном режиме работы могут создать устойчивую систему морских течений, обеспечивающих контролируемо-благоприятные

экологические условия в обширном регионе. Гипотетическим финалом этой деятельности должно стать образование глобальной системы управления состоянием Мирового океана, т.е., по сути, управления биосферой.

Выводы

1. В условиях существующего роста народонаселения планеты и объема мирового производства, расширение и углубление техногенеза Мирового океана неизбежно. Единственным реальным путем предотвращения развития катастрофических последствий этого процесса является разработка методов управления им на основе создания иерархии управляемых природно-технических систем.
2. Изучение различных аспектов техногенеза Мирового океана и разработка методов управления ими должны предшествовать значимому проявлению их негативных экологических и экономических последствий.
3. Разработка эффективных методов управление процессом техногенеза Мирового океана может быть осуществлена только на основе креативной парадигмы решения экологических проблем, подразумевающей активную деятельность по корректированию природных процессов. Выполнение этой задачи подразумевает развитие междисциплинарного научно-технического сотрудничества и синкретический подход к осмыслению и решению проблем.
4. Управление техногенезом Мирового океана требует создание международных правовых основ этой деятельности и консолидацию усилий различных стран по комплексному решению экологических, экономических и геополитических проблем.

Литература

Безносов В.Н. Экологические последствия нарушения стратификации моря. Дисс. … докт. биол. наук. М., 2000a. 449 с.

Безносов В.Н. Крупномасштабные нарушения гидрологической структуры океана, биотические кризисы и их фиксация в геологической летописи // Стратиграфия, геологическая корреляция. 2000b. Т. 8. № 3. С. 3-13.

Виноградов М.Е. Современные тенденции изменения экосистемы Черного моря // Вестник АН СССР. 1987. № 10. С. 56-67.

Гулин М.Б. К актуализации исследований перманентного накопления донных отложений из аллохтонных и автохтонных взвесей в пресноводных и морских водоемах // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» (г. Петрозаводск, 06-11 июля 2015 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т. 1. С. 407-413.

Кабанова Ю.Г., Доманов М.М. Некоторые особенности удобрения морских вод для марикультуры // Экология фауны и флоры прибрежных

References

Alcérreca-Huerta J.C., Encarnacion J.I., Ordoñez-Sánchez S., Callejas-Jiménez M., Barroso G.G.D., , Allmark M., Mariño-Tapia I., Casarín R.S., O'Doherty T., Johnstone C., Carrillo L. Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, vol. 7, iss. 5, p. 147. DOI: 10.3390/jmse7050147

Beznosov V.N. *Ekologicheskie posledstviya narusheniya stratifikatsii morya. Diss. dokt. biol. nauk [Environmental consequences of violations sea stratification. Dr. Sci. (Biology) Thesis]*. Moscow, 2000a. 449 p. (In Russian).

Beznosov V.N. Krupnomasshtabnye narusheniya gidrologicheskoi struktury okeana, bioticheskie krizisy i ikh fiksatsiya v geologicheskoi letopisi [Large-scale violations of the hydrological structure of the ocean, biotic crisis and fix them in the fossil record]. *Stratigrafiya, geologicheskaya korrelyatsiya [Stratigraphy, Geological Correlation]*, 2000b, t. 8. no. 3, pp. 3-13. (In Russian).

Chee S.Y., Othman A.G., Sim Y.K., Adam A.N.M., Firth L.B. Land reclamation and artificial islands: Walking the tightrope between development and conservation. *Global Ecology and Conservation*,

зон океана / Отв. ред. А.П. Кузнецов. М.: Изд. ИО АН СССР, 1985. С. 93-100.

Найдин Д.П., Похиалайнен В.П., Кац Ю.И., Красилов Ю.А. Меловой период. Палеогеография и палеоокеанология. М.: Наука, 1986. 262 с.

Резниченко О.Г. Классификация и пространственно-масштабная характеристика биотопов обрастания // Биология моря. 1978. № 4. С. 3-15.

Резниченко О.Г., Солдатова И.Н., Цихон-Луканина Е.А. Обрастание в мировом океане. М.: Изд. ВИНИТИ, 1976. 120 с.

Суздалева А.Л. Создание управляемых природно-технических систем. М.: ИД ЭНЕРГИЯ, 2016. 160 с.

Суздалева А.Л. Экологическая глобалистика: востребованность, задачи и основные направления // Естественные и технические науки. 2019. № 9 (135). С. 69-70.

Суздалева А.Л., Безносов В.Н., Горюнова С.В. Биологические инвазии в природно-технических системах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 3. С. 34-39.

Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2014. 456 с.

Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Биотехносфера: экология и безопасность жизнедеятельности. М.: МГПУ, 2017. 240 с.

Alcérreca-Huerta J.C., Encarnacion J.I., Ordoñez-Sánchez S., Callejas-Jiménez M., Barroso G.G.D., Allmark M., Mariño-Tapia I., Casarín R.S., O'Doherty T., Johnstone C., Carrillo L. Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 5. P. 147. DOI: 10.3390/jmse7050147

Chee S.Y., Othman A.G., Sim Y.K., Adam A.N.M., Firth L.B. Land reclamation and artificial islands: Walking the tightrope between development and conservation // Global Ecology and Conservation. 2017. Vol. 12. P. 80-95. DOI: 10.1016/j.gecco.2017.08.005

2017, vol. 12, pp. 80-95. DOI: 10.1016/j.gecco.2017.08.005

Givi A.A., Karimi S., Sadat M., Zoghi M., Karimi S., Foroughi N., Malekmohamadi B. Ecological risk assessment of construct artificial islands by fault tree analysis method in the Persian gulf. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 2015, vol. 3, iss. 3, pp. 139-146. DOI: 10.11648/j.ijema.20150303.15

Gulin M.B. K aktualizatsii issledovanii permanentnogo nakopleniya donnykh otlozhenii iz allokhtonnykh i avtokhtonnykh vzvesei v presnovodnykh i morskikh vodoemakh [By updating the study of permanent accumulation of sediments of allochthonous and autochthonous sediment in freshwater and marine waters]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Nauchnoe obespechenie realizatsii «Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda» (g. Petrozavodsk, 06-11 iyulya 2015) [Collection of scientific works of the All-Russian scientific conference "Scientific support for implementation of the" Water Strategy of the Russian Federation for the period up to 2020 "(Petrozavodsk, 06-11 July 2015)].* Petrozavodsk: Publ. of Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2015, t. 1, pp. 407-413. (In Russian).

Kabanova Yu.G., Domanov M.M. Nekotorye osobennosti udobreniya morskikh vod dlya marikul'tury [Some features of sea water fertilizer for mariculture]. In Kuznetsov A.P. (ed.) *Ekologiya fauny i flory pribrezhnykh zon okeana [Ecology of the ocean coastol zone benthic fauna and flora]*. Moscow, Publ of IO AN SSSR, 1985, pp. 93-100. (In Russian).

Lin T., Fan W., Xiao C., Yao Z., Zhang Z., Zhao R., Pan Y., Chen Y. Energy Management and Operational Planning of an Ecological Engineering for Carbon Sequestration in Coastal Mariculture Environments in China. *Sustainability*, 2019, vol. 11, iss. 11, pp. 3162. DOI: 10.3390/su11113162

Liu C.C.K. Ocean thermal energy conversion and open ocean mariculture: The prospect of Mainland-Taiwan collaborative research and development. *Sustainable Environment Research*, 2018, vol. 28, iss. 6, pp. 267-273. DOI: 10.1016/j.serj.2018.06.002

Givi A.A., Karimi S., Sadat M., Zoghi M., Karimi S., Foroughi N., Malekmohamadi B. Ecological risk assessment of construct artificial islands by fault tree analysis method in the Persian gulf // International Journal of Environmental Monitoring and Analysis. 2015. Vol. 3. Iss. 3. P. 139-146. DOI: 10.11648/j.ijema.20150303.15

Lin T., Fan W., Xiao C., Yao Z., Zhang Z., Zhao R., Pan Y., Chen Y. Energy Management and Operational Planning of an Ecological Engineering for Carbon Sequestration in Coastal Mariculture Environments in China // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 11. P. 3162. DOI: 10.3390/su11113162

Liu C.C.K. Ocean thermal energy conversion and open ocean mariculture: The prospect of Mainland-Taiwan collaborative research and development // Sustainable Environment Research. 2018. Vol. 28. Iss. 6. P. 267-273. DOI: 10.1016/j.serj.2018.06.002

Sol D., Weis J.S. Highlights and Insights from "Biological Invasions and Animal Behaviour" // Aquatic Invasions. 2019. Vol. 14. Iss. 3. P. 551-565. DOI: 10.3391/ai.2019.14.3.12

Xu Y., Hoitink A.J.F., Zheng J., Kästner K., Zhan W. Analytical model captures intratidal variation in salinity in a convergent, well-mixed estuary // Hydrology and Earth System Sciences. 2019. Vol. 23. Iss. 10. P. 4309-4322.
DOI: 10.5194/hess-23-4309-2019

Naidin D.P., Pokhialainen V.P., Kats Yu.I., Krasilov Yu.A. *Melovoi period. Paleogeografiya i paleookeanologiya [Cretaceous period. Paleogeography and paleookeanologiya].* Moscow, Publ. Nauka, 1986. 262 p. (In Russian).

Reznichenko O.G. Klassifikatsiya i prostranstvenno-masshtabnaya kharakteristika biotopov obrastaniya [Classification and space-scale characterization of habitats fouling]. *Biologiya morya [Russian Journal of Marine Biology],* 1978, no. 4, pp. 3-15. (In Russian).

Reznichenko O.G., Soldatova I.N., Tsikhon-Lukanina E.A. *Obrastanie v mirovom okeane [Fouling in the oceans].* Moscow, Publ. VINITI, 1976. 120 p. (In Russian).

Sol D., Weis J.S. Highlights and Insights from "Biological Invasions and Animal Behaviour". *Aquatic Invasions*, 2019, vol. 14, iss. 3, pp. 551-565. DOI: 10.3391/ai.2019.14.3.12

Suzdaleva A.L. *Sozdanie upravlyaemykh prirodno-tekhnicheskikh system [Creation of managed natural-technical systems].* Moscow, Publ. ID ENERGIYa, 2016. 160 p. (In Russian; abstract in English).

Suzdaleva A.L. Ekologicheskaya globalistika: vostrebovannost', zadachi i osnovnye napravleniya [Ecological globalistics: demand, tasks and main directions]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]*, 2019, no. 9 (135), pp. 69-70. (In Russian; abstract in English).

Suzdaleva A.L., Beznosov V.N., Goryunova S.V. Biologicheskie invazii v prirodno-tekhnicheskikh sistemakh [Biological invasions in natural-technical systems] *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [RUDN Journal of Ecology and Life Safety]*, 2015, no. 3, pp. 34-39. (In Russian; abstract in English).

Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. *Tekhnogenez i degradatsiya poverkhnostnykh vodnykh ob"ektov [Technogenesis and degradation of surface water objects].* Moscow, Publ. ID ENERGIYa, 2014. 456 p. (In Russian; abstract in English).

Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. *Biotekhnosfera: ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Biotechnosphere: ecology and life safety].* Moscow, Publ. MGPU, 2017. 240 p. (In Russian).

Vinogradov M.E. Sovremennye tendentsii izmeneniya ekosistemy Chernogo morya [Modern trends in the ecosystem of the Black Sea Changes]. *Vestnik AN SSSR [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR]*, 1987, no 10, pp. 56-67. (In Russian).

Xu Y., Hoitink A.J.F., Zheng J., Kästner K., Zhan W. Analytical model captures intratidal variation in salinity in a convergent, well-mixed estuary. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, vol. 23, iss. 10, pp. 4309-4322.
DOI: 10.5194/hess-23-4309-2019

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 528.88:626.33

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.32

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ БЕСХОЗЯЙНЫХ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

К.А. Курганович, А.В. Шаликовский, М.А. Босов, Д.В. Кочев

Восточный филиал Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Чита, Россия
naptheodor@mail.ru

Аннотация. В Забайкальском крае существует большое количество бесхозяйных противопаводковых защитных гидротехнических сооружений, построенных без надлежащего проектирования и контроля правильности соблюдения технологии производства работ. Часть дамб не имеет собственников и не учтены в регистре гидротехнических сооружений, их состояние и режим использования не контролируются. В процессе эксплуатации защитные дамбы подвергаются механическим и гидродинамическим воздействиям, что несет в себе угрозу повышенного риска возникновения дополнительного ущерба вследствие переоцененного уровня защищенности территорий. Необходим учет таких сооружений с целью вынесения рекомендаций по дальнейшему их использованию или проведению ремонта.

В данной статье описывается опыт использования беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) для обследования бесхозяйных

THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MONITORING THE CONDITION OF OWNERLESS FLOOD CONTROL HYDRAULIC STRUCTURES OF THE TRANS-BAIKAL TERRITORY

Konstantin A. Kurganovich, Andrey V. Shalikovskiy, Maxim A. Bosov, Denis V. Kochev

Eastern Branch of Russian Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources (FGBU RosNIIVH), Chita, Russia
naptheodor@mail.ru

Abstract. There are a large number of ownerless flood control protective hydraulic structures built without proper design and correct observance of the production technology in the Trans-Baikal Territory. Some dams do not have owners and are not registered in the «Register of hydraulic structures», their condition and mode of use are not controlled. During operation, protective dams are subjected to mechanical and hydrodynamic influences, which carries an increased risk of additional damage due to the overestimated level of protection of the territories. It is necessary to take into account such structures in order to make recommendations for their further use or repair.

This article describes the experience of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for examining ownerless flood control protective hydraulic structures of the Trans-Baikal Territory. The scheme of conducting such surveys, which includes several stages, is considered. At the initial stage, the installation of ground reference points markers and their coordination is required. Then, the UAV is circled

Kurganovich K.A., Shalikovskiy A.V., Bosov M.A., Kochev D.V. The use of unmanned aerial vehicles for monitoring the condition of ownerless flood control hydraulic structures of the Trans-baikal territory. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 32-43 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.32

противопаводковых защитных гидротехнических сооружений Забайкальского края. Рассмотрена схема проведения таких обследований, включающая в себя несколько этапов. На начальном этапе требуется установка наземных опорных точек-маркеров и их координирование, затем облет территории БПЛА и получение серии фотоснимков. Следующий этап включает фотограмметрическую обработку данных съемки и получение пространственно-привязанных модели рельефа местности и ортофотоплана, которые затем подвергаются анализу с целью выявления дефектов сооружений.

Использование БПЛА при обследовании защитных противопаводковых сооружений продемонстрировало возможность более качественного оценивания их состояния по сравнению с традиционными методами инструментальных наблюдений. Для получения наилучшего результата в моделировании рекомендуется производить съемку с высоты не более 200 м и использовать координированные опорные точки, которые видно с воздуха для привязки модели к системе координат. В этом случае ошибка в определении отметок поверхности земли не будет превышать пространственного разрешения снимка. Местоположение опорных точек не оказывает существенного влияния на точность определения модели рельефа.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА); цифровая модель рельефа местности; бесхозяйные противопаводковые защитные гидротехнические сооружения; аэрофотосъемка; ортофотоплан; фотограмметрическая обработка снимков.

over the territory and a series of photographs is taken. The next step involves photogrammetric processing of the survey data and obtaining spatially-linked terrain and orthomosaic models, which are then analyzed to identify structural defects.

The use of UAVs during the inspection of flood control structures demonstrated the possibility of a better assessment of their condition compared to traditional instrumental observation methods. To obtain the best result in the simulation, it is recommended to shoot from a height of not more than 200 m and use coordinated reference points that are visible from the air to bind the model to the coordinate system. In this case, the error in determining the elevation of the earth's surface will not exceed the spatial resolution of the image. The location of the control points does not significantly affect the accuracy of determining the terrain model.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs); structure from motion; terrain model; orthomosaic; ownerless flood control protective hydraulic structures; aerial photography; photogrammetric image processing.

Введение

Инженерные мероприятия по защите территорий от затопления в результате наводнений на реках обычно включают в себя строительство защитных дамб, которые необходимы для создания контура с повышенными отметками и отсечения территории от воды во время паводка. Однако вследствие кажущейся простоты возведения таких сооружений, их строительство зачастую осуществляется хозяйственным способом, без надлежащего проектирования и контроля правильности соблюдения технологии производства работ. Часть дамб, построенных в авральном режиме во время прохождения паводков, вообще не имеет собственников и не учтены в регистре гидротехнических сооружений, их состояние и режим

Курганович К.А., Шаликовский А.В., Босов М.А., Кочев Д.В. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга состояния бесхозяйных противопаводковых гидротехнических сооружений Забайкальского края // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 1. С. 32-43. DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.32

использования не контролируются. При этом в процессе эксплуатации защитные дамбы подвергаются механическим и гидродинамическим воздействиям, что приводит к их частичному разрушению, возникновению просадок гребня, промоин в теле, нарушению крепления откосов.

Такая ситуация несет в себе угрозу повышенного риска возникновения дополнительного ущерба вследствие переоцененного уровня защищенности территорий [Шаликовский, Курганович, 2011; Shalikovskiy, Kurganovich 2017]. Необходимы инструментальные и визуальные наблюдения за неучтенными бесхозяйными противопаводковыми сооружениями с целью выдачи рекомендаций по дальнейшему их использованию или проведению ремонта. Стандартными практиками в таких случаях являются как наземные, так и дистанционные виды съемок. Среди исследований первого типа самыми широко распространенными являются GNSS-изыскания, тахеометрическая съемка и наземные лазерные сканеры. Эти способы исследования сравнительно недорогие и имеют хорошую точность, но являются трудоемкими в случаях картирования больших по площади территорий и не всегда позволяют передать все особенности рельефа, его специфических элементов. Если же требуется повышение пространственного разрешения данных наземной топографической съемки, то при этом трудоемкость их получения и обработки увеличивается пропорционально квадрату расстояния. Для мониторинга больших по протяженности сооружений и больших площадей за короткие интервалы времени используются также данные дистанционного зондирования, аэрофотосъемка, спутниковые снимки и данные лидарного зондирования [Курганович и др., 2017]. Их основные ограничения заключаются в сравнительно высокой стоимости и сложности получения изображений за строго выбранный момент времени.

В последнее время в мониторинге сооружений все большее применение находят новые способы исследования, основанные на использовании беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) [Ridolfi et al., 2017; Khaloo et al., 2018;]. Оценка состояния противопаводковых защитных гидротехнических сооружений с использованием БПЛА является инновационным подходом, предоставляющим возможности перехода от традиционного к усовершенствованному обследованию объекта, а выработка методики и оценка ее применимости является необходимой и актуальной задачей.

Материалы и методы

При использовании стандартной конфигурации оборудования, БПЛА состоит из цифровой фотокамеры, закрепленной на пропеллерном или крылатом летательном аппарате, который управляется дистанционно с земли. Аппарат производит съемку местности, полученная серия снимков анализируется с использованием алгоритмов реконструкции трехмерной сцены из фотографий, таких как *structure from motion* (далее – SfM). В результате реконструкции получается цифровая модель рельефа высокого разрешения и ортофотоплан местности. Метод *SfM* является в настоящее время наиболее развитым алгоритмом получения трехмерных моделей местности и наиболее широко используемым в практике проведения съемок с БПЛА [James, Robson, 2012; Westoby et al., 2012]. Он использует алгоритмы обработки серии изображений, сделанных с перекрытием и сдвигом относительно друг друга. В этом случае не требуется априорная информация о геометрии сцены съемки, расположении камеры и ее ориентации в пространстве, все данные становятся доступными из итеративного процесса сопоставления и корректировки серии большого количества пересекающихся изображений. Данный подход наилучшим образом реализуется применительно к серии снимков с высокой степенью взаимного перекрытия, позволяющего захватить трехмерную структуру сцены, видимую с разных позиций [Westoby et al., 2012] (рисунок 1).

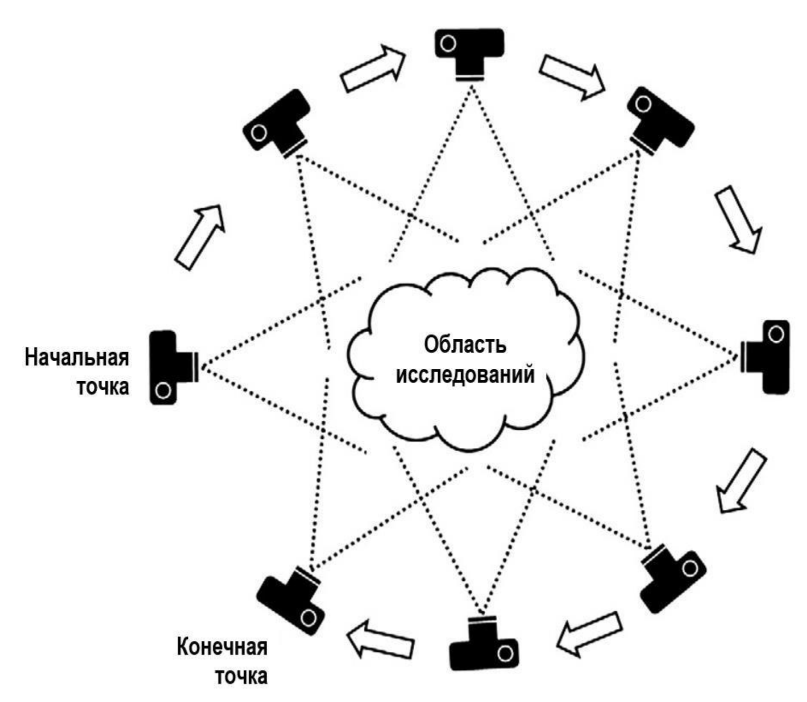


Рисунок 1. Схема съемки трехмерного объекта для дальнейшей фотограмметрической обработки по [Westoby et al., 2012]

Figure 1. Scheme of shooting a three-dimensional object for further photogrammetric processing from [Westoby et al., 2012]

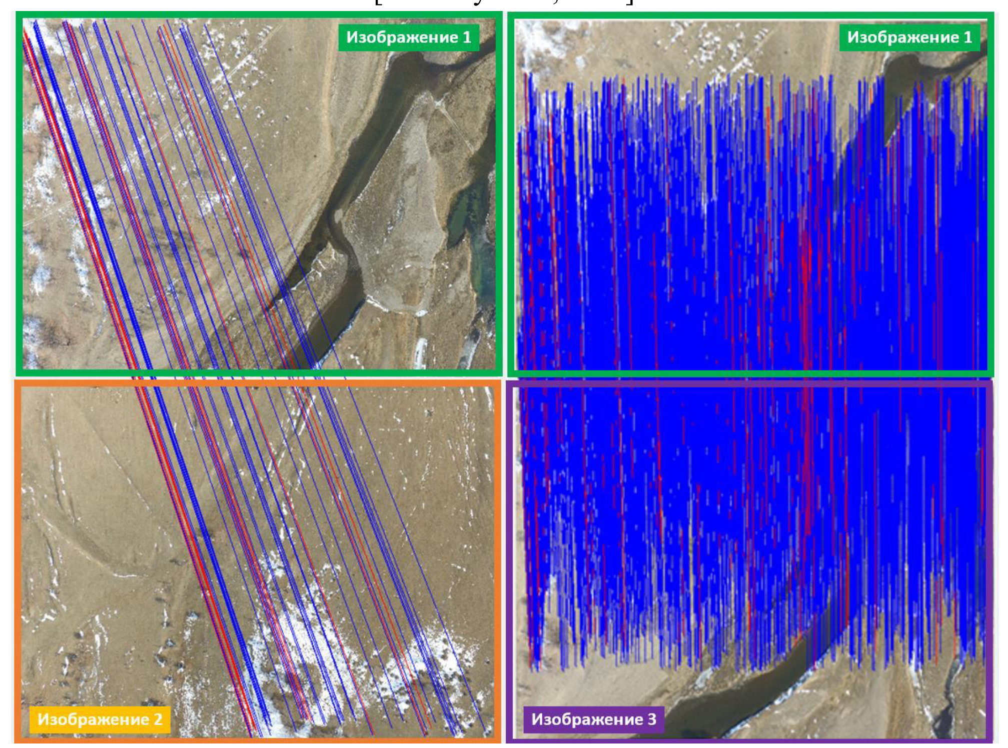


Рисунок 2. Пример поиска попарно соответствующих пикселей на изображениях с. Усть-Иля по методу SfM в Agisoft Photoscan (синим обозначены корректные связи, красным – некорректные, слева – 44 соответствия, справа – 2988 соответствий)

Figure 2. An example of a search for pairwise matching pixels in images of Ust-Ilya village according to the Structure from Motion method in Agisoft Photoscan (the blue color indicates correct connections, the red color indicates incorrect connections, there are 44 matches on the left side and 2988 matches on the right side)

Местоположение камеры и геометрия сцены реконструируется одновременно путем автоматической идентификации совпадающих элементов на множестве изображений (рисунок 2). Эти элементы отслеживаются от одного изображения к другому, что позволяет улучшать оценку местоположения камеры и координат объектов за счет итерационного процесса нелинейной минимизации наименьших квадратов, так как множество решений становится доступным после расширения базы данных снимков. Позиции камер, рассчитанные по методу SfM, не имеют ни масштаба, ни ориентации в пространстве, которые были бы получены по координатам наземных точек. В связи с этим трехмерное облако точек генерируется в некоторой относительной системе координат «пространства изображений», которая может быть привязана к реальной системе координат посредством явного указания реально существующих наземных точек. Эти наземные точки можно определить с помощью получения координат с устройств глобальных навигационных систем GNSS или выполнения других видов топографо-геодезических изысканий. В последнее время сочетание изображений, полученных с БПЛА и при реконструкции топографии с использованием алгоритма SfM, успешно применяется при исследовании разнообразных форм рельефа, трехмерных объектов зданий и сооружений. Оценка точности полученной модели обычно производится путем ее сравнения с другими методиками получения моделей местности высокого разрешения. При этом технологическая схема проведения работ включает в себя следующие этапы [Westoby et al., 2012] (рисунок 3):

1. Координирование сети наземных опорных точек и маркировка их местоположения любым способом, позволяющим определить их с фотоснимков, сделанных БПЛА.

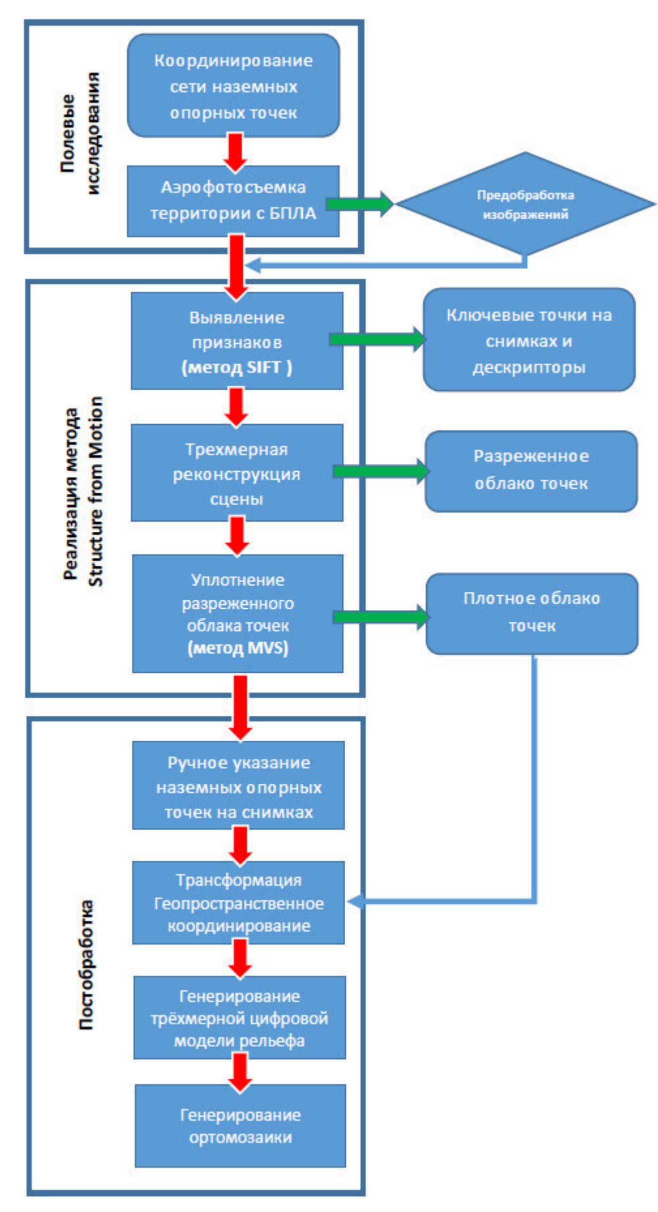


Рисунок 3. Технологическая схема фотограмметрической обработки снимков БПЛА с использованием метода SfM

Figure 3. Technological scheme of photogrammetric processing of UAV images using the Structure from Motion method

2. Аэрофотосъемка исследуемой территории с использованием БПЛА. Фотоснимки, полученные с использованием БПЛА, имеют записанные в exif-теге географические координаты положения камеры в тот момент, когда они были выполнены.
3. Реализация алгоритмов фотограмметрической обработки снимков по методу SfM с получением пространственно-ориентированного плотного облака точек местности.

4. Постобработка плотного облака точек с получением трехмерной модели местности и ортофотоплана высокого пространственного разрешения.

В рамках данных исследований была произведена оценка точности построения трехмерной модели защитных противопаводковых дамб в населенных пунктах Забайкальского края, полученной по данным БПЛА. Для анализа были выбраны защитные сооружения в с. Урейск, с. Усть-Иля и г. Шилка.

На подготовительном этапе полевых работ было произведено пространственное координирование участка с привязкой к существующим пунктам плановой и высотной геодезической сети. Топографо-геодезическая съемка выбранных объектов выполнялась с использованием GNSS комплекта Trimble R8s+R10 с постобработкой на Trimble Business Center. Привязка к местной системе координат МСК-75 производилась на пунктах Государственной геодезической сети 2 и 3 классов. Координирование участков, их перепроецирование в систему координат WGS 1984 с целью дальнейшей обработки и построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа высокого разрешения производилась в среде ArcGIS 10.Для получения аэрофотоснимков разрешением 4000×3000 пикселей использовался БПЛА DJI Phantom 3, оснащенный камерой Sony EXMOR FC300S. Камера имеет сенсор CCD с разрешением 12 мп и 20 мм широкоугольную линзу (35 мм эквивалент). Максимальный вес БПЛА составляет 1,5 кг. Полеты аппарата были запрограммированы с использованием программного обеспечения Pix4D Capture и Ctrl+DJI для обеспечения полного покрытия изучаемой местности на высоте 200 м, скоростью полета 6 м/с и автоматическим выполнением фотографий каждые 2 с. Запись координаты положения камеры в exif-тег производилась с использованием устройства GPS, установленного на борту беспилотного аппарата (рисунок 4).



Рисунок 4. Местоположение точек съемки фотокамеры, установленной на БПЛА (с. Усть-Иля)
Figure 4. The location of the shooting points of the camera mounted on the UAV (Ust-Ilya village)

Для генерирования цифровой модели рельефа и ортофотопланов из аэрофотоснимков, выполненных в надир, использовалось программное обеспечение Agisoft Photoscan[1]. На первом этапе фотоснимки выравнивались по алгоритму SfM [Ullman, 1979], который идентифицирует ключевые точки изображения и последовательно отслеживает их движение. Оценивание позиции камеры является одним из самых ответственных компонентов алгоритма SfM [Szeliski, 2010]. Результатами выполнения первого этапа являются:

1) трехмерное облако точек, представляющее геометрию изучаемой области;
2) относительное местоположение камеры во время проведения съемки;
3) параметры внутренней калибровки (фокусное расстояние, коэффициенты дисторсии линзы).

Второй этап подразумевает построение плотного облака точек. В зоне, прилегающей к воде большинство изображений, частично

[1] http://www.agisoft.ru

покрывают водную поверхность, которая должна быть исключена из топографии модели. Это производилось с помощью нанесения маски средствами Photoscan. На третьем этапе использовался алгоритм *multi-view stereo (MVS)* основанный на концепции компьютерного зрения, позволяющий произвести реконструкцию трехмерной сцены по серии пересекающихся аэрофотоснимков [Westoby et al., 2012]. Далее полученная трехмерная модель местности подвергалась текстурированию и привязке к системе координат с целью получения ортофотоплана и цифровой модели рельефа (рисунок 5).

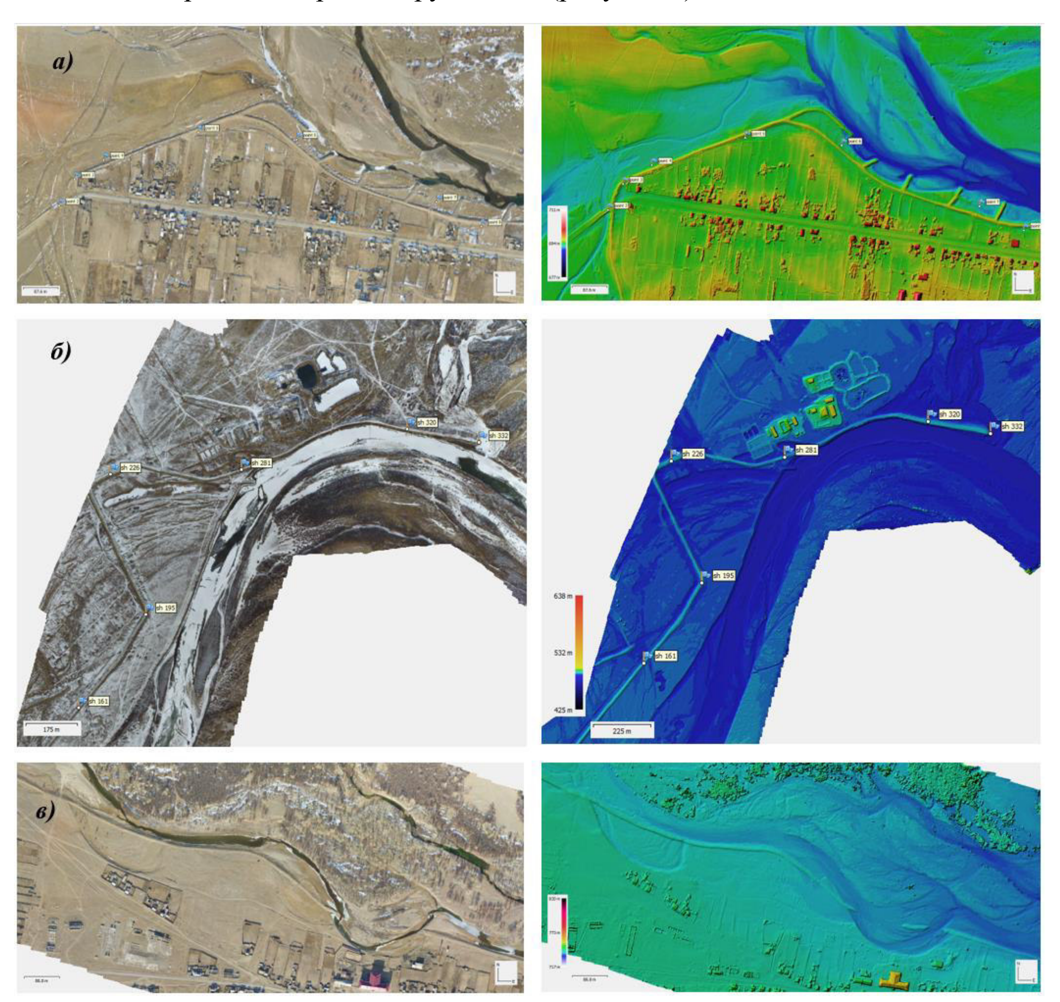


Рисунок 5. Фрагмент ортофотоплана и цифровой модели местности
а) с. Усть-Иля, б) г. Шилка, в) с. Урейск

Figure 5. Fragment of orthomosaic and digital terrain model
a) Ust-Ilya village, б) Shilka town, в) Ureysk village

Результаты и обсуждение

Всего было осуществлено 4 запуска БПЛА в с. Усть-Иля, 5 – в с. Урейск и 7 в г. Шилка. Каждый из полетов БПЛА покрывал площадь 0,6 км^2 с получением около 130 фотоснимков при угле поворота камеры в 90 град. Размытые, а также не покрывающие изучаемую территорию фотоснимки удалялись из анализа, в результате фотограмметрической обработке подвергались 95–100 снимков. Время сбора серии снимков составляло 12 минут с использованием одной батареи за один полет. На этапе построения разреженного облака точек проводилась проверка достаточности перекрытия снимков, пересекающихся на исследуемой территории. Участки, где наблюдалось одновременное наложение менее 4 снимков, считались недостоверными и в дальнейшем не рассматривались. Сведения о геометрических параметрах модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры модели
Table 1. Geometric parameters of the model

Населенный пункт	Количе-ство снимков	Разреженное облако то-чек, млн.	Плотное облако то-чек, млн.	Пространственное разрешение растра ортофотоплана, м	Пространственное разрешение растра цифровой модели ре-льефа, м
с. Урейск	646	0,28	152,2	0,079	0,161
г. Шилка	921	0,23	168,4	0,078	0,156
с. Усть-Иля	498	0,15	104,1	0,079	0,159



Рисунок 6. Наземные метки опорных точек (слева – вид с земли, справа – вид с высоты 200 м)
Figure 6. Ground marks of control points (left - view from the ground, right - view from a height of 200 m)

Для проверки достоверности полученной цифровой модели рельефа и истинных значений использовалась сеть наземных опорных точек, которые отмечались на твердых основаниях, не подвергавшихся изменениям за время исследования. Опорные точки представляли собой белые квадраты размером 1x1 метр, закрепленные на поверхности земли металлическими кольями. Размеры квадрата на снимке составляли около 20x20 пикселей (рисунок 6).

В каждом населенном пункте было размещено по 10 квадратов, их точные координаты и высотные отметки использовались при построении цифровой модели местности путем явного указания на всех фотоснимках местонахождения точки привязки. Так как полученная трехмерная модель защитных противопаводковых дамб в каждом из населенных пунктов базировалась только на 10 точках привязки, необходимо было оценить точность ее построения в других точках. Такая оценка выполнена путем сравнения двух вариантов – имеющиеся данные наземной съемки с использованием GNSS и данные, полученные в тех же точках, но по данным моделирования рельефа с БПЛА (рисунок 7). Первый вариант был использован как эталонный для сравнения и получения оценки эффективности второго варианта. Критерием являлась величина среднеквадратичной ошибки моделирования (m), определенная по формуле (1):

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_{i,м}-Z_{i,э})^2}{n}} \qquad (1)$$

где $Z_{i,м}$ – отметка поверхности в контрольной точке, определенная по результатам моделирования с использованием БПЛА;

$Z_{i,э}$ – отметка поверхности в контрольной точке, определенная по результатам наземных приборных измерений (эталонная);

n – количество контрольных точек.



Рисунок 7. Ортофотоплан с. Усть-Иля с наземными опорными точками (выделены зеленым) и контрольными точками аэрофотосъемки с БПЛА (выделены красным), отрезками показаны кратчайшие расстояния от контрольных до опорных точек

Figure 7. Orthophoto map of Ust-Ilya village with ground control points (highlighted in green) and control points of aerial photography with UAVs (highlighted in red), the shortest distances from control to reference points are shown by segments

Таблица 2. Параметры оценивания точности модели

Table 2. Model accuracy assessment parameters

Населен-ный пункт	Длина дамбы, м	Опорных точек для привязки	Точек в контроль-ной вы-борке	Среднеквадратическая ошибка определения вы-сотных отметок по мо-дели (*m*), м	Коэффициент корреляции ошибки определения от-метки и расстояния до опорной точки
с. Урейск	3403	10	108	0,104	0,05
г. Шилка	3834	10	103	0,091	0,02
с. Усть-Иля	2200	10	83	0,139	0,004

Очевидно, что величина среднеквадратичной ошибки по наблюденным пунктам, составляющая 0,09…0,14 м, не превышает пространственное разрешение цифровой модели рельефа, которое составляет около 0,16 м (таблица 2) и зависит от высоты съемки, разрешения съемочного аппарата и следующей за этим детальности модели.

Также был произведен анализ возможных причин, влияющих на возникновение ошибки при моделировании рельефа. Была проверена гипотеза о влиянии удаленности опорной точки привязки модели от контрольных точек, по которым вычислялась ошибка. В случае наличия такой связи была бы отмечена высокая корреляция величины разности отметок и расстояния. Получить подтверждения этой гипотезе не удалось, коэффициенты корреляции изменялись незначительно выше нуля (таблица 2).

Исследование моделей защитных сооружений и прилегающей территории, выполненных с высокой детальностью, предоставляет возможность количественно оценивать объемные характеристики разрушений дамб и возможные последствия мероприятий по ремонту. При этом переход от традиционного к усовершенствованному обследованию на основании анализа компьютерных 3D-моделей объекта позволяет более качественно анализировать рельеф поймы и защищаемой территории, деформации русла, произошедшие за период эксплуатации линейных защитных сооружений.

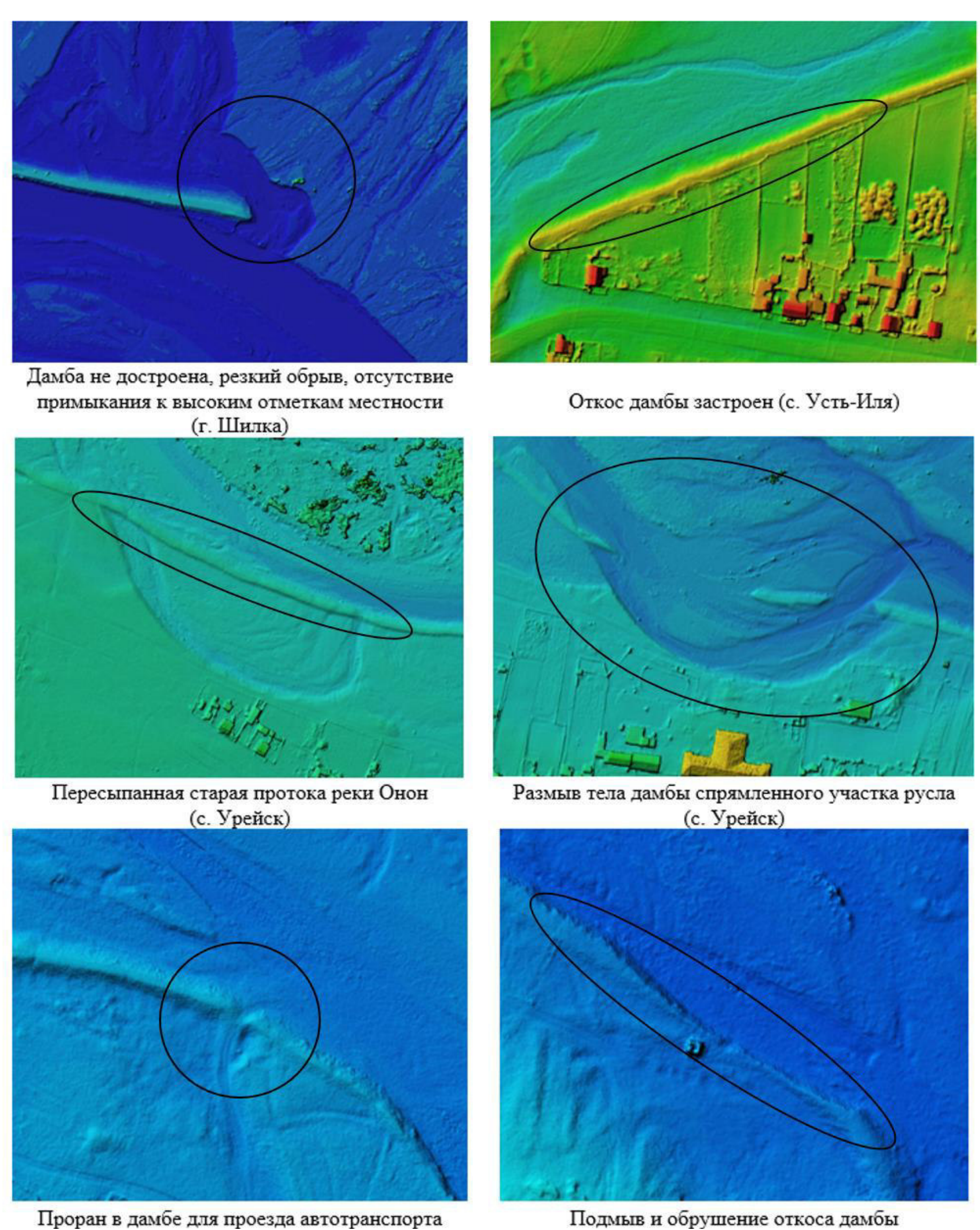


Рисунок 8. Обнаружение дефектов защитных сооружений на модели, полученной по данным съемки с БПЛА

Figure 8. Detection of defects in protective structures on a model obtained from UAV survey data

Пример обнаружения таких дефектов и их оценка на примере трех рассматриваемых сооружений представлены на рисунке 8. Основными дефектами защитных противопаводковых сооружений являются непроектные съезды и переезды через гребень

дамбы с деформацией гребня, устройство в дамбе выемки для проезда автотранспорта и прогона животных, обрушение откосов. Для дальнейшего использования защитных сооружений рекомендуется проведение их капитального ремонта.

Заключение

Использование БПЛА при изучении возможных дефектов в защитных противопаводковых сооружениях продемонстрировало возможность более качественного оценивания их состояния. Для получения наилучшего результата в моделировании рекомендуется производить съемку с высоты не более 200 м и использовать координированные опорные точки, которые видно с воздуха для привязки модели к системе координат. В этом случае ошибка в определении отметок поверхности земли не будет превышать пространственного разрешения снимка. Местоположение опорных точек не оказывает существенного влияния на точность определения модели рельефа.

Литература

Курганович К.А., Шаликовский А.В., Курганович Н.А., Голятина М.А. Опыт применения данных дистанционного зондирования Земли и беспилотных летательных аппаратов для решения водохозяйственных задач // Сборник материалов XIV Международного научно-практического симпозиума и выставки «Чистая вода России» (г. Екатеринбург, 18-20 апреля 2017 г.). Екатеринбург, 2017. С. 58-62.

Шаликовский А.В., Курганович К.А. Оценка опасности и риска хозяйственного использования речных пойм бассейна Верхнего и Среднего Амура // Вестник Читинского государственного университета. 2011. № 11 (78). С. 119-124.

James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2012. Vol. 117. Iss. F3. P. F03017. DOI: 10.1029/2011JF002289

Khaloo A., Lattanzi D., Jachimowicz A., Devaney C. Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam // Frontiers in Built Environment. 2018. Vol. 4. Art. 31. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00031

Ridolfi E., Buffi G., Venturi S., Manciola P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys // Sensors. 2017. Vol.17. Iss. 8. P. 1777. DOI: 10.3390/s17081777

References

James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research Atmospheres,* 2012, vol. 117, iss. F3, p. F03017. DOI: 10.1029/2011JF002289

Khaloo A., Lattanzi D., Jachimowicz A., Devaney C. Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam. *Frontiers in Built Environment,* 2018, vol. 4, art. 31. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00031

Kurganovich K.A., Shalikovskiy A.V., Kurganovich N.A., Golyatina M.A. Opyt primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya resheniya vodokhozyaistvennykh zadach [The practical experience of remote sensing and unmanned aerial vehicles using for water management tasks solution]. *Sbornik materialov Chetyrnadtsatogo Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma i vystavki "Chistaya voda Rossii" (g. Ekaterinburg, 18-20 aprelya 2017) [Proceedings of XIV International scientific-practical symposium and exhibition "Clean Water of Russia" (Ekaterinburg, April 18-20, 2017)],* Ekaterinburg, 2017, pp. 58–62 (In Russian; abstract in English)

Ridolfi E., Buffi G., Venturi S., Manciola P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys. *Sensors,* 2017, vol. 17, iss. 8, p. 1777. DOI: 10.3390/s17081777

Shalikovskiy A., Kurganovich K. Flood hazard and risk assessment in Russia. *Natural Hazards*, 2017,

Shalikovskiy A., Kurganovich K. Flood hazard and risk assessment in Russia // Natural Hazards. 2017. Vol. 88. Iss. S1. Pp. 133-147.

Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. Available at: http://szeliski.org/Book/

Ullman S. The interpretation of structure from motion // Proceedings of Royal Society London Biological Sciences. 1979. Vol. 203. Iss. 1153. Pp. 405-426. DOI: 10.1098/rspb.1979.0006

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. 2012. Vol. 179. Pp. 300-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021

vol. 88, iss. S1, pp. 133-147. DOI: 10.1007/s11069-016-2681-6

Shalikovskiy A.V., Kurganovich K.A. Otsenka opasnosti i riska khozyaistvennogo ispol'zovaniya rechnykh poim basseina Verkhnego i Srednego Amura [Hazard and risk assessment for commercial use of the Upper and Middle Amur basin floodplains]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta [Chita State University Journal],* 2011, vol. 11 (78), pp. 119-124. (In Russian; abstract in English)

Szeliski R. *Computer vision: algorithms and applications*. Available at: http://szeliski.org/Book/

Ullman S. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of Royal Society London Biological Sciences,* 1979, vol. 203, iss. 1153, pp. 405-426. DOI: 10.1098/rspb.1979.0006

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012, vol. 179, pp. 300–314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021

УДК 556.53
DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.44

СВЯЗЬ ЭКСТРЕМУМОВ МИНИМАЛЬНОГО ЗИМНЕГО СТОКА РЕК С ТЕМПЕРАТУРНЫМ И ЛЕДОВЫМ ФАКТОРАМИ

Е.В. Гуревич
Государственный гидрологический институт, г. Санкт–Петербург, Россия
gewita@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению изменения стока рек при разных температурных и ледовых условиях зимних сезонов на примере отдельных рек северо-запада России. Происходящие изменения климата в последние три десятилетия привели к изменениям условий формирования водного режима рек, в том числе зимнего меженного стока. Поэтому изучение изменений зимнего стока рек в условиях потепления климата имеет важное значение как для познания общих закономерностей формирования речного стока, так и для рационального управления водными ресурсами с учетом изменений величины стока рек.

Температура воздуха и толщина льда являются интегральными показателями изменений термических условий в речном бассейне и в реке, регулируя через криогенные процессы питание подземных вод и их разгрузку в реки в зимний период. Поэтому в качестве основных предикторов в работе использованы температура воздуха, толщина льда и зимний сток рек. Для получения количественных оценок был выполнен сравнительный анализ изменения величины стока рек к концу зимы при разных температурных и ледовых условиях. Проанализированы ряды зимнего стока рек бассейнов рек Ловать, Сясь, Северная Двина и Онега с общим периодом наблюдений за стоком и толщиной речного льда – 1955-2016 гг., температурой воздуха – 1936-2016 гг.

На основе анализа рядов наблюдений за стоком рек, толщиной льда и температурой воздуха

RELATION OF EXTREMES OF MINIMUM WINTER RIVER FLOW WITH TEMPERATURE AND ICE FACTORS

Elena V. Gurevich
State hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
gewita@yandex.ru

Abstract. Studies performed in different river basins in the North-West of Russia have shown that a combination of temperature and ice conditions plays a significant role in changing the winter water content of rivers.

Air temperature and ice thickness are integral indicators of changes in thermal conditions in the river basin and in the river, regulating through cryogenic processes the supply of groundwater and its discharge into rivers in winter. Therefore, the main predictors used in the work are air temperature, ice thickness, and winter river flow. To obtain quantitative estimates, a comparative analysis of changes in river flow by the end of winter under different temperature and ice conditions was performed. The series of winter runoff of rivers in the basins of the Lovat, Syas, Northern Dvina and Onega rivers with the total period of observations of the runoff and the thickness of the river ice are analyzed –1955-2016 years, temperature – 1936-2016 years.

Based on the analysis of a series of observations of river flow, ice thickness, and air temperature lasting more than 50 years, it is concluded that the lowest values of the minimum winter flow of rivers were observed in cold winters, and the highest values were observed in milder winter seasons. With comparable pre-winter water content of rivers in a series of mild non-thawing winters, river flow in the studied basins decreased less intensively and the minimum winter flow was higher on average by 10-20%, and in some cases more.

Gurevich E.V. Relation of extremes of minimum winter river flow with temperature and ice factors. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 44-52. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.44

продолжительностью более 50 лет сделаны выводы о том, что наименьшие значения минимального зимнего стока рек наблюдались в холодные зимы, а наибольшие – в более мягкие зимние сезоны. Исследования, выполненные в разных речных бассейнах, показали, что в изменении зимней водности рек существенную роль играет сочетание температурных и ледовых условий. При сопоставимой предзимней водности рек в серию мягких безоттепельных зим сток рек в исследуемых бассейнах снижался менее интенсивно и минимальный зимний сток был выше в среднем на 10-20%, а в отдельных случаях и более.

Ключевые слова: холодные и теплые зимы; зимний речной сток; гидрографы стока рек; предзимняя водность рек; температура воздуха; толщина льда.

Keywords: cold and warm winters; winter river flow; river flow hydrographs; pre- winter water content of rivers; air temperature; ice thickness.

Введение

Речной лед играет существенную роль в физических, биологических и химических процессах, контролирующих пресноводные режимы в холодных регионах. Кроме того, изменение количественных и временных характеристик ледяного покрова рек может иметь огромные экономические последствия для развития речного хозяйства.

Высокая и низкая межени как сезонные экстремумы гидрологических характеристик дают представление не только об амплитуде колебаний минимального стока рек, но и являются проявлениями климатической нестабильности, которая выражается в чередовании холодных и теплых периодов на фоне маловодных и многоводных фаз, то есть в изменении температурных и водных условий формирования речного стока. Экстремальные значения минимального зимнего стока определяются не только предзимней водностью рек, но и вариациями температурных и ледовых условий. В аспекте зимнего стока похолодание или потепление зим через термические эффекты в реке и на водосборе оказывают влияние на изменчивость расходов воды как через изменения соотношения жидких и твердых осадков, процессов таяния льда и снега, продолжительности зимы, так и через толщину ледяного покрова рек [Марков, Гуревич, 2008; Гуревич, 2012]. Ледяной покров оказывает задерживающий и аккумулирующий эффекты на разгрузку подземных вод по длине реки в течение холодного периода года [Соколов, Любимов, 1986; Марков, Гуревич, 2018]. Поэтому в более мягкие зимы происходит бо̀льшая сработка запасов подземных вод в речных бассейнах, чем в суровые зимы, что отражается в увеличении объемов меженного стока рек [Smith et al., 2007].

Материалы и методы

Для сравнительного анализа динамики снижения зимнего стока малых рек в зависимости от суровости зим были выбраны 10 рек бассейна р. Ловать, 7 рек бассейна р. Сясь, 5 рек бассейна р. Северная Двина и 3 реки бассейна р. Онега с общим периодом наблюдений за стоком и толщиной речного льда с 1955 по 2016 год. Суровость зим оценивалась по многолетним рядам наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях Великие Луки, Тихвин, Вологда, Онега с общим периодом наблюдений 1936-2016 гг.

Зима может быть теплая и маловодная, холодная и средняя по водности или теплая и

многоводная и т.д., в результате чего вклад температурного фактора в формирование стока при неравных условиях водности рек будет также неодинаков. Вследствие отличия водных и температурных условий в разные зимы и пространственной неоднородности величин стока в речном бассейне, оценка влияния периодов потепления или похолодания зим на величину речного стока может быть выполнена с рядом объективных допущений.

Сравнение гидрографов стока рек и величин стока в теплую и холодную зимы при относительно равной водности рек в начале зим проводилось при выполнении следующих основных условий сравнения стока рек:

— сопоставимость предзимней водности рек в верховье, т.е. одинаковые или близкие начальные условия снижения расходов воды на малых реках;
— отличие зимних температур воздуха в сравниваемые сезоны;
— отсутствие оттепелей и жидких осадков зимой.

Как показал анализ исходной информации, за имеющийся период наблюдений можно отобрать только 1-2 (в редких случаях 3) пары зим, при которых соблюдаются эти условия

Результаты и обсуждения

Выполнено сравнение гидрографов стока р. Оки ($F_{вдсб}$=310 км^2, бассейн р. Ловать) в разные по суровости зимы 1957-58 гг. и 1963-64 гг. при сопоставимом предзимнем увлажнении речного бассейна в ноябре (рисунок 1а). Средняя температура воздуха зимнего сезона 1957-58 гг. $T_{ср.XII\text{-}II} = -6°C$ и зимы 1963-64 гг. $T_{ср.XII\text{-}II} = -8°C$. Несмотря на небольшую разницу средней температуры воздуха (в $-2°C$) в эти зимы, внутрисезонные температурные колебания были существенны (таблица 1, данные метеостанции Великие Луки), что отразилось на различных ледовых условий в сравниваемые сезоны. Толщина февральского льда в более теплую зиму 1957-58 гг. на посту р. Ока – д. Борок составляла 32 см, что на 10 см меньше чем в феврале более холодной зимы 1963-64 гг.

Такое же сравнение гидрографов стока произведено для р. Дымка ($F_{вдсб}$=112 км^2, бассейн р. Сясь) в мягкую зиму 1980-81 гг. при $T_{ср.XII\text{-}II}$= −6,1°C и холодную зиму 1967-68 гг. ($T_{ср.XII\text{-}II}$= −12,6°C) при одинаковых начальных условиях снижения расходов воды (таблица 1, рисунок 1б). Толщина февральского льда к концу зимы 1980-81 гг. на р. Дымка у д. Домачево составляла 28 см и была на 13 см меньше, чем в конце более холодного зимнего сезона 1967-68 гг.

Как видно из рисунков 1а и 1б, при сходных расходах воды в ноябре, но при разном температурном режиме зим, наблюдаются существенные отличия темпов снижения стока рек, что выразилось в превышении расходов воды рек в теплую зиму над величиной стока рек в более суровый зимний сезон. Так, среднемесячные расходы воды р. Оки у д. Борок к концу холодной зимы 1963-64 гг. были в 3,8 раза ниже, чем в более мягкую зиму 1957-58 гг. (рисунок 1а). Сток р. Дымки у д. Домачево к концу холодной зимы 1967-68 гг. был ниже в 3,1 раза, чем в более теплую зиму 1980-81 гг. (рисунок 1б).

Соотношение изменения водности рек к февралю относительно ноября по длине бассейна демонстрируют рисунки 1в и 1г. В целом в бассейне р. Ловать снижение стока рек к концу холодной зимы было больше чем в теплые зимы в среднем на 26% (рисунок 1в), а в бассейне р. Сясь – на 33%. Наименьшие значения минимального зимнего стока рек наблюдались в холодные зимы, а наибольшие – в более мягкие зимние сезоны.

Таблица 1. Среднемесячные зимние температуры воздуха (°С)
Table 1. Average monthly winter air temperatures (°С)

Зимний период	Декабрь	Январь	Февраль	Средняя за зиму температура воздуха
метеостанция Великие Луки				
1957-58 гг.	–4,3	–7,2	–6,9	–6,1
1963-64 гг.	–8,2	–5,8	–10,1	–8,0
метеостанция Тихвин				
1980-81 гг.	–5,2	–6,2	–7,0	–6,1
1967-68 гг.	–11,1	–19,0	–7,8	–12,6

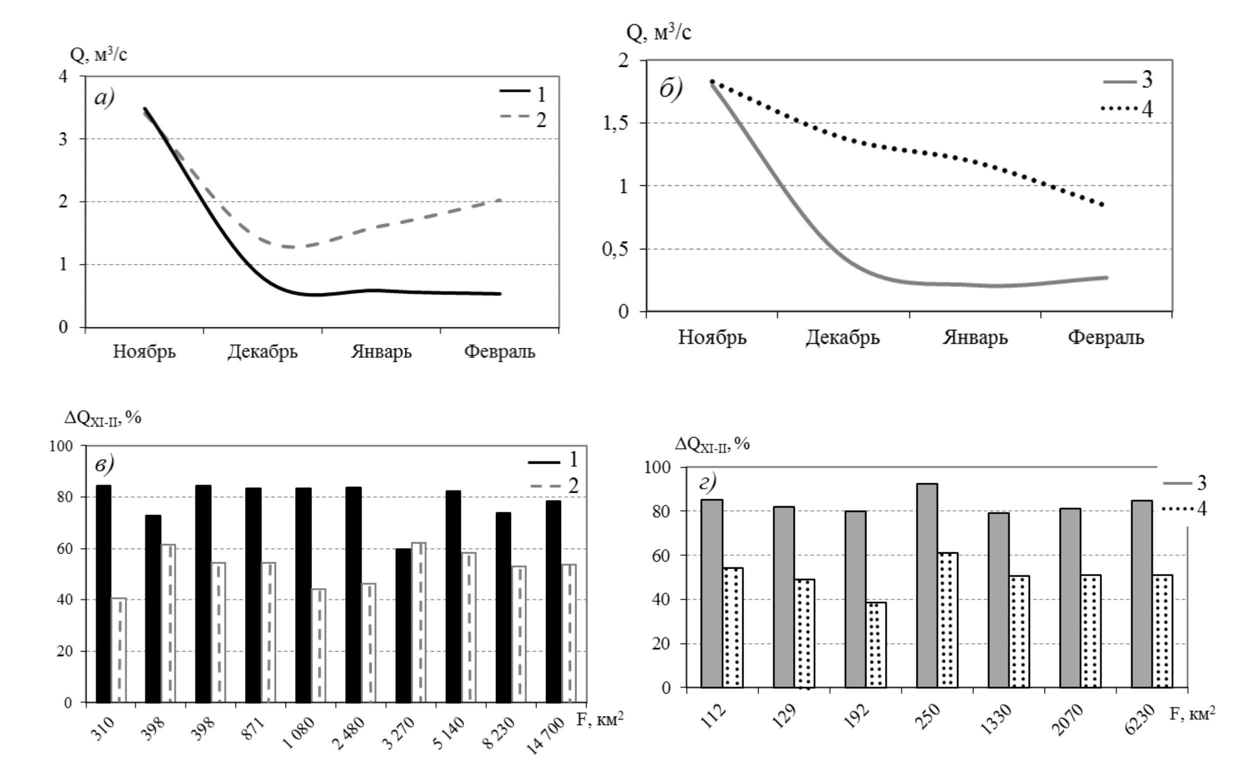
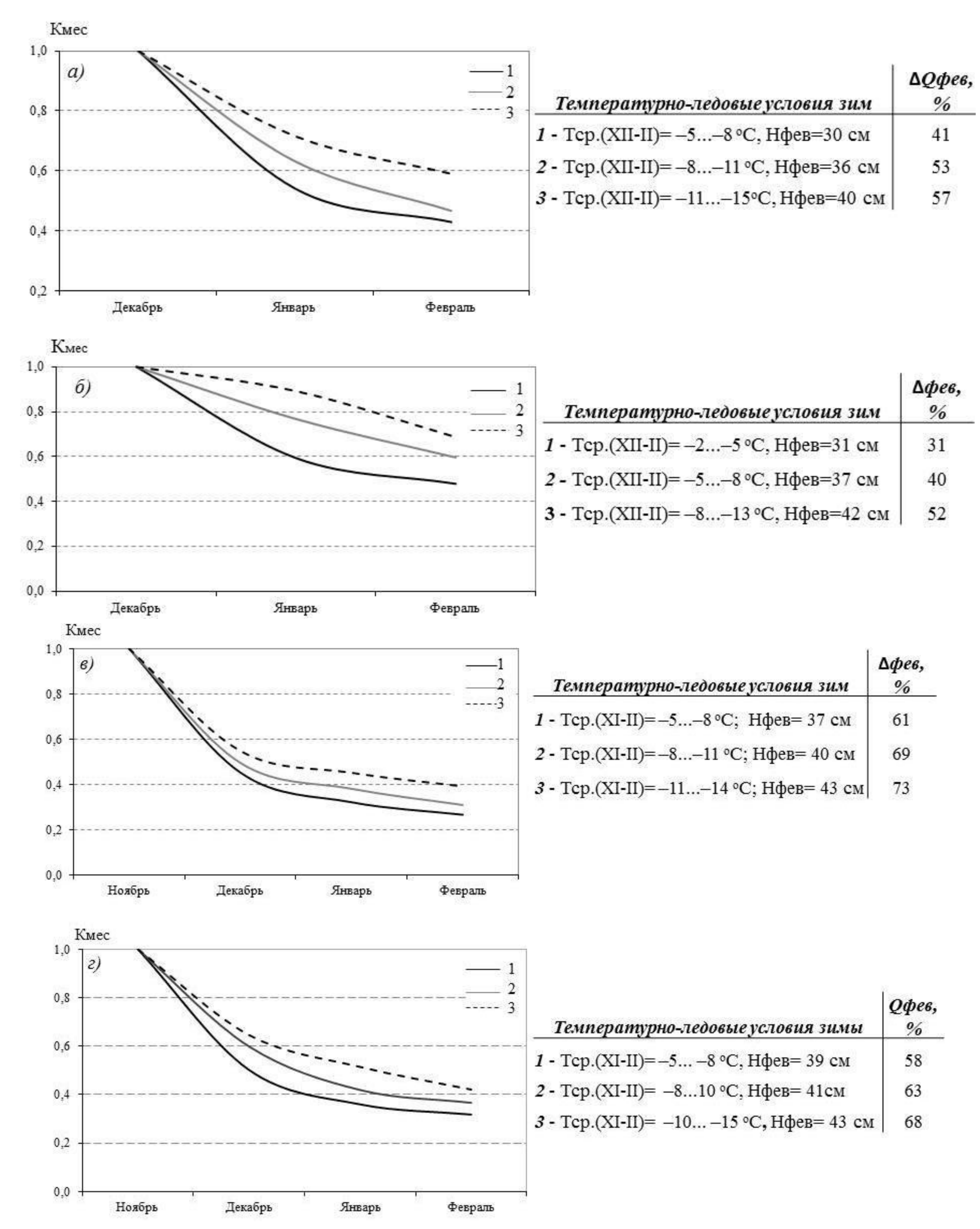


Рисунок 1. Изменение стока рек в разные по суровости зимы в бассейнах:
а) гидрограф стока р. Ока – д. Борок F=310 км²; б)гидрограф стока р. Дымка – д. Домачево F=112 км²;
в) снижение стока рек к февралю относительно ноября (%) в бассейне р. Ловать;
г) снижение стока рек к февралю относительно ноября (%) в бассейне р. Сясь:
1 – зима 1963-64 гг. ($T_{ср.XII-II}$= –8°С); 2 – зима 1957-58 гг. ($T_{ср.XII-II}$= –6,1°С);
3 – зима 1967-68 гг. ($T_{ср.XII-II}$= –12,6°С); 4 – зима 1980-81 гг. ($T_{ср.XII-II}$= –6,1°С)

Figure 1. Changes in river flow in different severe winters in the basins:
a) flow hydrograph of the river Oka – village Borok F=310 km²;
b) flow hydrograph of the river Dymka – village Domachevo F=112 km²;
c) decrease in river flow in February relative to November (%) in the basin of the river Lovat;
d) decrease in river flow in February relative to November (%) in the basin of the river Syas:
1 – winter 1963-64 ($T_{av.XII-II}$= –8°C); 2 – winter 1957-58 ($T_{av.XII-II}$= –6.1°C);
3 – winter 1967-68 ($T_{av.XII-II}$= –12.6°C); 4 – winter 1980-81 ($T_{av.XII-II}$= –6.1°C)



Температурно-ледовые условия зим	ΔQфев, %
1 - Тср.(XII-II)= –5…–8 °С, Нфев=30 см	41
2 - Тср.(XII-II)= –8…–11 °С, Нфев=36 см	53
3 - Тср.(XII-II)= –11…–15°С, Нфев=40 см	57

Температурно-ледовые условия зим	Δфев, %
1 - Тср.(XII-II)= –2…–5 °С, Нфев=31 см	31
2 - Тср.(XII-II)= –5…–8 °С, Нфев=37 см	40
3 - Тср.(XII-II)= –8…–13 °С, Нфев=42 см	52

Температурно-ледовые условия зим	Δфев, %
1 - Тср.(XI-II)=–5…–8 °С; Нфев= 37 см	61
2 - Тср.(XI-II)=–8…–11 °С; Нфев= 40 см	69
3 - Тср.(XI-II)=–11…–14 °С; Нфев= 43 см	73

Температурно-ледовые условия зимы	Qфев, %
1 - Тср.(XI-II)=–5… –8 °С, Нфев= 39 см	58
2 - Тср.(XI-II)= –8…10 °С, Нфев= 41см	63
3 - Тср.(XI-II)= –10… –15 °С, Нфев= 43 см	68

Рисунок 2. Изменение зимнего стока рек при разных температурных и ледовых условиях:
а) бассейн р. Сясь *F*<250 км^2; б) бассейн р. Ловать *F*<400км^2;
в) бассейн р. Северная Двина *F*<255 км^2; г) бассейн р. Онега *F*<900 км^2:
1 – холодная зима; 2 – средняя по суровости зима; 3 – мягкая зима

Figure 2. Changes in winter river flow under different temperature and ice conditions:
a) the basin of the river Syas F<250 km^2; b) the basin of the river Lovat F<400 km^2;
c) the basin of the river Northern Dvina F<255 km^2; d) the basin of the river Onega F<900 km^2:
1 – cold winter; 2 – average severity of winter; 3 – mild winter

Для рек бассейнов рек Сясь, Ловать, Северная Двина и Онега была получена серия кривых истощения стока за многолетний период, подтверждающих связь стока небольших рек с зимней температурой воздуха и толщиной речного льда (рисунок 2). Для этого

исследовались ежегодные кривые истощения стока, которые рассчитывались по группам рек. При расчете кривых истощения стока использовались относительные значения стока рек ($К_{мес}$), что позволяет обобщить эту величину для нескольких рек, не пренебрегая площадью водосбора. Величина $К_{мес}$ характеризует собой снижение стока рек каждый месяц относительно расхода воды в декабре или ноябре ($К_{мес}=Q_{XII,I,II}/Q_{XII}$ или $К_{мес}=Q_{XI,XII,I,II}/Q_{XI}$ соответственно, где Q – среднемесячные расходы воды). Включение ноября в анализ кривых истощения стока северных рек бассейнов рек Северная Двина и Онега обусловлено более ранним переходом температуры воздуха через ноль. Относительные значения $К_{мес}$ осреднялись по группе исследуемых рек. Для формирования серийных выборок совокупность разбивалась по признаку средней за зиму температуры воздуха. Для обобщенных по температурным характеристикам серий зим по полученным $К_{мес}$ рассчитывались средние кривые истощения стока за периоды декабрь – февраль (для бассейнов рек Сясь и Ловать) и ноябрь – февраль (для бассейнов рек Северная Двина и Онега), а также величина уменьшения расходов воды с ноября (декабря) к февралю ($\Delta Q_{фев}$, %).

Сравнение величин $\Delta Q_{фев}$ за серии разных по суровости зим показало, что наибольшие отклонения снижения стока рек за зиму от начальных зимних условий к февралю отмечаются в холодные зимы. Так, в относительно мягкие зимы в верховье р. Сясь при средней толщине речного льда в феврале 30 см сток малых рек с декабря по февраль снизился на 41%, а в более холодные зимы при толщине льда 40 см снижение стока было интенсивнее и составило 57%, т.е. в холодные зимы февральские расходы воды были ниже на 16% (рисунок 2а).

При зимней температуре воздуха в диапазоне (–10…–15°С) с начала зимы сток рек уменьшился на 52% в бассейнах р. Ловать, на 68-73% в бассейнах р. Северная Двина и р. Онега (рисунки 2б, 2в, 2г). В серию зим с температурами воздуха в диапазоне (–5…–8°С) сток рек в исследуемых бассейнах снижался менее интенсивно и был выше на 10-21%, чем в более суровые зимние периоды. Более интенсивное снижение стока рек к концу зим в бассейнах р. Северная Двина и р. Онега обусловлены более суровыми криогенными процессами на водосборах северных районов.

Интенсивность и продолжительность спада зимних расходов воды в реках находится в прямой зависимости от предзимних запасов воды в речном бассейне и развития процессов ледообразования, аккумулирующих значительную часть зимнего речного стока [Соколов, Черная, 1984; Чижов, 1990]. Характер влияния толщины февральского льда ($H_{л\ фев}$) на снижение стока рек к концу зимнего сезона в разных речных бассейнах показывает рисунок 3, полученный на основе ранее выполненного обобщения серий зимних сезонов (таблица 1, рисунок 2). Рисунок 3 отражает общую тенденцию, подтверждающую связь февральской толщины льда небольших рек с величиной снижения стока за зиму. Mѐньшая толщина льда соответствует теплой зиме, бòльшая – холодной. При увеличении толщины речного льда на 10 см минимальный сток рек в бассейнах р. Сясь снижался на 16%, р. Ловать на 21%, р. Северная Двина на 11%. В бассейне р. Онега минимальный сток в теплую зиму был на 10% выше, чем в холодную.

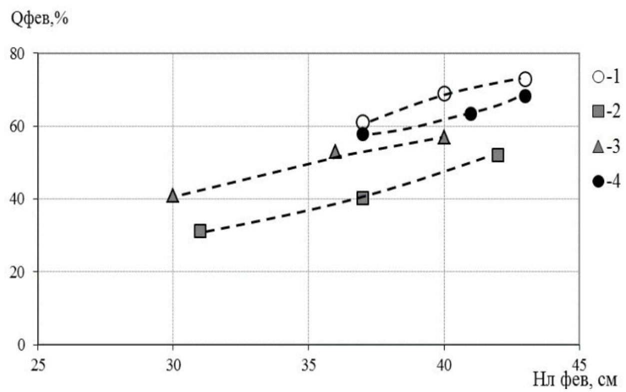


Рисунок 3. Обобщенный график связи стока рек к концу зимы с толщиной льда (февраль): 1 – р. Северная Двина; 2 – р. Ловать; 3 – р. Сясь; 4 – р. Онега; пунктирная линия – тенденции

Figure 3. Generalized graph of the relationship of river flow by the end of winter with ice thickness (February): 1 – river Northern Dvina; 2 – river Lovat; 3 – river Syas; 4 – river Onega; dotted line – the trend

Толщина льда является индикатором климатических изменений [Magnuson et al., 2000] и интегральным показателем суровости зим. Чем ниже температура воздуха зимой и больше толщина ледяного покрова, тем быстрее происходит снижение стока в реке. В менее суровые зимы мы наблюдаем уменьшение толщины речного льда и сохранение в реке более высоких расходов воды к концу зимы. В мягкие зимы влияние ледяного покрова на сток ослабевает пропускная способность русел улучшается за счет уменьшения толщины льда, снижаются потери стока на аккумуляцию воды в ледяном покрове и увеличивается питание рек подземными водами. Таким образом, в фазу потепления зим при относительно неизменных годовых осадках будет происходить бóльшая сработка запасов подземных вод в речных бассейнах, чем это было ранее.

Влияние температуры воздуха через твердую фазу воды на зимний речной сток проявляется на разных уровнях взаимодействия, создавая цепную реакцию изменений в общем речном бассейне. Отрицательную температуру воздуха, хотя она и является первопричиной появления льда на реках, нельзя считать доминантой в процессе формирования зимнего стока рек. Это «корректирующий» фактор, который взаимодействует с фактором предзимних бассейновых запасов воды. Результатами этого взаимодействия на реках являются термический режим, ледовые явления и зимние расходы воды и т.п., а на речном водосборе – промерзание почвогрунтов, миграция влаги к фронту промерзания и др. Степень взаимодействия будет определяться интенсивностью похолодания, водностью сезона и процессом водообмена в речном бассейне, отражением которого является изменение соотношений поверхностных и подземных вод. Зимой, при отсутствии жидких осадков, реки питаются преимущественно подземными водами, интенсивность поступления которых к реке регулируется криогенными процессами на поверхностном и в подземном водосборах, а интенсивность разгрузки в реки регулируется соотношением уровней воды в реке и подземных вод. Поэтому в результативном аспекте температура воздуха и процессы, происходящие в реке (нарастание льда, изменение расходов и уровней воды и т.п.) являются интегральными показателями изменения термических условий во всем речном бассейне.

Заключение

Температура воздуха и толщина льда рек являются показателями изменений термических условий в реке и в речном бассейне. Исследования, выполненные в разных речных бассейнах, показали, что в изменении зимней водности рек существенную роль играет ледовый фактор. При сопоставимой предзимней водности рек в серию мягких безоттепельных зим сток рек в исследуемых бассейнах снижался менее интенсивно и минимальный зимний сток был выше на 10-20%, а в отдельных случаях и более, чем в более суровые зимние периоды при бóльшей толщине льда на реках.

Результаты, полученные в ходе исследования связи речного стока с ледовым фактором, расширяют научное представление об особенностях формирования зимнего стока рек в изменяющихся климатических условиях.

Литература

Гуревич Е.В. Влияние суровости зимы на неравномерность формирования зимнего стока в речном бассейне // Метеорология и гидрология. 2012. № 7. С. 92-99.

Марков М.Л., Гуревич Е.В. О регулирующей роли ледяного покрова рек в водном режиме территорий // Материалы всероссийской

References

Chizhov A.N. *Formirovanie ledyanogo pokrova i prostranstvennoe raspredelenie ego tolshchiny [Ice pack formation and space distribution of the ice pack depth].* Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1990. 125 p. (In Russian; abstract in English).

Gurevich E.V. Winter severity effects on the nonuniformity of winter flow formation in a river basin.

научно-практической конференции с международным участием «Водохозяйственные проблемы и рациональное природопользование» (г. Оренбург, 13-15 марта 2008 г.). Оренбург: ГОУ ОГУ. Пермь: Пермский университет, 2008. Ч. 1. Водохозяйственные проблемы. С. 193-198.

Марков М.Л., Гуревич Е.В. Негативное влияние потепления зим на расходы рек и уровни дренируемых ими грунтовых вод [Электронный ресурс] // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». 2018. URL: https://clck.ru/MNkLd (дата обращения: 01.03.2020).

Соколов Б.Л., Любимов Г.А. Ледяной покров и зимний сток рек восточной части БАМа // Труды ГГИ. Выпуск 312. Вопросы гидрологии БАМа / Под ред. Б.М. Доброумова. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. С.11-33.

Соколов Б.Л., Черная Ф.Ф. Оценка ежегодных потерь зимнего стока на образование речных наледей и речного льда (на примере Северо-Востока СССР) // Труды ГГИ. Выпуск 300. Исследования подземного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 50-61.

Чижов А.Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 125 с.

Magnuson J.J., Wynne R.H., Benson B.J., Robertson D.M. Lake and river ice as a powerful indicator of past and present climates // Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen. 2000. Vol. 27. Iss. 5. P. 2749-2756.
DOI: 10.1080/03680770.1998.11898166

Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle. Journal of Geophysical Research. Biogeosciences. 2007. Vol. 112. Iss. G4. G04S47. DOI: 10.1029/2006JG000327

Russian Meteorology and Hydrology, 2012, vol. 37, iss. 7, pp. 495-500. (Russ ed.: Gurevich E.V. Vliyanie surovosti zimy na neravnomernost' formirovaniya zimnego stoka v rechnom basseine. *Meteorologija i gidrologija,* 2012, no. 7, pp. 92-99). DOI: 10.3103/S1068373912070096

Markov M.L., Gurevich E.V. O reguliruyushchei roli ledyanogo pokrova rek v vodnom rezhime territorii [On the regulatory role of river ice cover in the water regime of territories]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vodokhozyaistvennye problemy i ratsional'noe prirodopol'zovanie» (g. Orenburg, 13-15 marta 2008) [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Water management problems and rational nature management" (Orenburg, March 13-15, 2008)]*. Orenburg: GOU OGU. Perm': Permskii universitet, 2008, vol. 1, pp. 193-198. (In Russian).

Magnuson J.J., Wynne R.H., Benson B.J., Robertson D.M. Lake and river ice as a powerful indicator of past and present climates. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen,* 2000, vol. 27, iss. 5, pp. 2749-2756.
DOI: 10.1080/03680770.1998.11898166

Markov M.L., Gurevich E.V. Negativnoe vliyanie potepleniya zim na raskhody rek i urovni dreniruemykh imi gruntovykh vod [The negative impact of wintering warming on river flows and levels of groundwater drained by them]. *Nezavisimyi elektronnyi zhurnal «GeoInfo» [Independent electronic journal "GeoInfo"]*, 2018. Available at: https://clck.ru/MNkLd (In Russian).

Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences,* 2007, vol. 112, iss. G4, G04S47. DOI: 10.1029/2006JG000327

Sokolov B.L., Chernaya F.F. Otsenka ezhegodnykh poter' zimnego stoka na obrazovanie rechnykh naledei i rechnogo l'da (na primere Severo-Vostoka SSSR) [Estimation of annual losses of winter runoff

on the formation of river ice and river ice (on the example of the North-East of the USSR)]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 300. Issledovaniya podzemnogo stoka [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 300. Underground Flow Research]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1984, pp. 50-61. (In Russian).

Sokolov B.L., Lyubimov G.A. Ledyanoi pokrov i zimnii stok rek vostochnoi chasti BAMa [Ice cover and winter runoff of rivers of the eastern part of BAM]. In Dobroumov B.M. (ed.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 312. Voprosy gidrologii BAMa [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 312. Issues of Hydrology of BAM]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1986, pp.11-33. (In Russian).

УДК 556.114.001.24(282.247.326.2)

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.53

ЕДИНАЯ ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА И КАЧЕСТВА ВОДНОГО СТОКА РЕКИ СЕЙМ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Э.А. Румянцева, Н.Н. Бобровицкая,
Е.С. Сухоногова

Государственный гидрологический институт,
г. Санкт–Петербург, Россия
bobrovi@ggi.nw.ru

Аннотация. Качество воды в настоящее время оценивается независимо от величины стока воды. Поэтому для водной отрасли особенно актуальным является получение единой оценки количества и качества водного стока рек. С помощью автоматизированного программного комплекса «Оценка показателей загрязнённого и чистого стока», разработанного в Государственном гидрологическом институте, стала возможной совместная обработка больших объёмов стандартных гидрохимических и гидрологических данных наблюдений на постах. Первая часть автоматизированного программного комплекса позволяет разделить объём речного стока по единичному загрязняющему компоненту на чистый, когда его концентрация в стоке не превышает предельно допустимых значений, и на загрязнённый, когда она выше ПДК. Основным показателем качества речного стока воды в этой методике является часть загрязнённого объёма, выраженная в процентах от общего объёма. Во второй части автоматизированного программного комплекса впервые производится разделение годового объёма речного стока на несколько частичных объёмов, различающихся по совокупности загрязняющих веществ, и по классам загрязнённости в соответствии с РД 52.24.643-2002[1]. Полученные оценки представлены в виде «паспорта качества стока» за определённый временной период. С помощью

A UNIFIED ASSESSMENT OF THE QUANTITY AND QUALITY OF THE SEIM RIVER WATER FLOW USING NEW AUTOMATED TECHNOLOGY

El'vira A. Rumyantseva,
Nelly N. Bobrovitskaya,
Ekaterina S. Sukhonogova
State hydrological Institute,
St. Petersburg, Russia
bobrovi@ggi.nw.ru

Abstract. Water quality is currently being evaluated regardless of the amount of water flow. Therefore, for the water industry, it is especially important to obtain a unified assessment of the quantity and quality of river water flow. Using the automated software package “Assessment of Polluted and Clean Runoff Indicators” developed at the State Hydrological Institute, it became possible to jointly process large volumes of standard hydrochemical and hydrological observation data at the posts. The first part of automated software package allows you to divide the volume of river flow by a single ingredient into pure when its concentration in the effluent does not exceed the maximum permissible concentrations (MPC), and into polluted when it is higher than the MPC. The main indicator of the quality of river water runoff in this method is the relative volume of runoff contaminated with a single ingredient. In the second part of automated software package, the annual volume of river flow is divided into partial volumes of various durations that differ in the composition of the complex of pollutants, and their degree of pollution is estimated by classes in accordance with ANON (2002) 52.24.643-2002[1]. The estimates obtained are presented as a “flow quality certificate”. Based on the data on water quality monitoring of the Department of Hydrometeorological Service of the Central Black Soil Regions, using the automated software package, the

автоматизированного программного комплекса по данным наблюдений Управления гидрометеорологической службы Центральных Черноземных Областей произведены оценки качества стока по единичным химическим веществам и по их совокупности в пограничном гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг. Показана многолетняя динамика качества стока р. Сейм и выявлены влияющие на нее факторы. Река Сейм впадает в реку Десна. Ближайший гидрологический пост расположен на р. Сейм в г. Рыльск. Площадь водосбора реки у г. Рыльск составляет 18 100 км^2, а расстояние поста от устья равно 359 км.

quality of runoff for single chemicals and their complexes was estimated in the border hydrochemical observation point of the Seim River – Tetkino village. Observation period is from 1993 to 2013.

Ключевые слова: река Сейм; автоматизированный программный комплекс; режимные наблюдения; загрязнённый сток; паспорт качества речного стока; динамика качества стока.

Keywords: the Seim River; automated software package; operational observations; polluted runoff; river flow quality certificate; flow quality dynamics.

[1]РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 48 с.
Guidance document 52.24.643-2002. A method for a comprehensive assessment of the degree of surface waters pollution by hydrochemical indicators. Saint-Petersburg, Hydrometeorological Publ., 2002. 48 p. (In Russian).

Введение

Современные оценки стока рек, как правило, ограничены количественными гидрологическими характеристиками. Оценки качества воды производятся независимо от гидрологических показателей стока, в частности его объёмов. Одним из актуальных направлений системы мониторинга стока рек, особенно трансграничных, является разработка методики, с помощью которой был бы получен индивидуальный «паспорт качества речного стока» для изучаемого участка реки и временного периода, связывающий количественные и качественные характеристики речного стока.

Единые оценки качества и количества стока могут стать документальной основой в водной отрасли России, а также могут быть использованы для научных изысканий в условиях изменяющейся антропогенной нагрузки на водные объекты, изменения климата и опасных процессов в гидросфере.

В Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный гидрологический институт» (далее – ФГБУ «ГГИ») создан и совершенствуется автоматизированный программный комплекс «Оценка показателей загрязнённого и чистого стока» (далее – АПК), с помощью которого возможна оперативная совместная и детальная обработка больших объёмов гидрологической и гидрохимической стандартной (режимной) информации. АПК работает под управлением операционной системы Microsoft Windows. Интерфейс программы состоит из трех основных структурных элементов: главного меню, управления данными по постам и результатов расчётов. Добавление в базу АПК как данных гидрохимических, так и гидрологических наблюдений осуществляется в формате Microsoft Excel. В одной рабочей области приводятся таблицы с расходами воды выбранного гидрометрического створа за весь представленный в архиве период наблюдений. В другой рабочей области – таблицы с гидрохимическими данными выбранного гидрохимического створа также за весь период наблюдений. Результаты расчетов представлены

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Sukhonogova E.S. A unified assessment of the quantity and quality of the Seim river water flow using new automated technology. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 53-70. (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.53

в АПК, как в наглядном графическом виде, так и в табличной форме.

Задачей данной работы явилась единая оценка количества и качества водного стока, как по единичным гидрохимическим компонентам, так и по их совокупностям в пограничном с Украиной гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино в период 1993-2013 гг. с помощью новой автоматизированной технологии с целью показать её оперативность и возможность использования результатов расчётов для решения различных задач водной отрасли, в частности для изучения факторов, формирующих качество стока рек.

Методы

АПК состоит из двух разных методик. Первая включает основные положения, разработанные ранее в ФГБУ «ГГИ»[2] , о показателях, связывающих величины стока воды с отдельными гидрохимическими компонентами [Караушев, Скакальский, 1973; Караушев, Скакальский, 1979; Скакальский, 1980; Методические основы, 1987].

Первая часть программного комплекса позволяет разделить объём речного стока по единичному гидрохимическому компоненту на чистый, когда его концентрация в стоке не превышает предельно допустимых значений (далее – ПДК), и на загрязнённый, когда она выше ПДК [Румянцева, Бобровицкая, 2012].

Основным показателем качества речного стока воды в первой части методики является относительный объём стока загрязненного единичным компонентом ($V_{заг}$, %). Он выражается отношением объёма стока загрязненной воды $V_{заг}$, перенесённой через заданный створ за год ко всему годовому стоку реки $V_{год}$.

Показатель относительной продолжительности загрязненного стока ($T_{заг}$, %) выражается отношением времени $T_{заг}$, в течение которого концентрация вещества в потоке выше ПДК, к общей продолжительности рассматриваемого промежутка времени, например, к одному году $T_{год}$.

Вторая часть АПК разработана на основе первой. Это новая методика, которая позволяет разделить объём речного стока на частичные объёмы, различающиеся совокупностью загрязняющих веществ, и оценить загрязнённость воды в этих объёмах в соответствии с РД 52.24.643-2002[3].

Для разделения годового объёма речного стока на частичные объёмы на одном хронологическом графике совмещаются периоды продолжительностей загрязнённого стока для всех загрязняющих компонентов. Это позволяет выделить продолжительности и соответственно частичные объёмы стока, различающиеся по составу загрязняющих веществ [Румянцева, Бобровицкая, Ильин, 2014]. В соответствии с РД 52.24.643-2002[4] в каждом частичном объёме была произведена оценка загрязнённости воды по классам и разрядам.

В конечном результате после объединения частичных объёмов воды, имеющих одинаковые степени загрязнённости (классы и разряды), получаем индивидуальный «паспорт качества речного стока» для изучаемого участка реки для каждого года и всего исследуемого периода. Он включает объединённые по классам и разрядам величины частичных расходов воды и продолжительностей их стока, их абсолютные и относительные величины, а также календарные даты их реализации. Кроме того, дается характеристика состояния загрязнённости для каждого класса и разряда.

Основными показателями качества речного стока воды во второй части методики являются относительные объёмы ($V_{заг}$, %) и относительные продолжительности ($T_{заг}$, %) частичных его объёмов разных классов загрязнённости.

Для проведения расчетов производилась линейная интерполяция измеренных значений концентраций гидрохимических показателей с

[2]Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязнённости рек и водоемов. Л.: ГГИ, 1977. 72 с.
[3]РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 48 с.
[4]Там же

использованием суточного шага гидрографа. Это позволяет сгладить особенности исходных рядов гидрохимической информации (её неоднородность, неэквидистентность, зависимость концентрации от водности реки) [Смыжова, 2010, Шелудко, Колесникова, Смыжова, 2010].

Расчеты для каждой доли объёмов осуществлялись не только по измеренным, но и по интерполированным значениям. Оценка качества стока воды за год и за весь период производилась с учетом вклада частичных объёмов различной продолжительности и качества.

Для выявления механизмов изменения качества стока р. Сейм за исследуемый период был применен факторный анализ. Факторы объединяют в одну группу переменные, которые могут быть прямо или косвенно связаны с некоторым определенным источником или процессом и которые условно можно считать репрезентативными [Иберла, 1980].

Характеристика данных наблюдений

В основу исследований положены гидрохимические и гидрологические данные 1993-2013 гг., полученные в результате режимных наблюдений Управления гидрометеорологической службы Центральных Черноземных Областей в пограничном с Украиной гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино и на ближайшем гидрологическом посту р. Сейм – г. Рыльск. Разница в площадях водосборов указанных пунктов наблюдений составляет 11%, в то время как совместное использование гидрологических и гидрохимических данных в территориально удалённых пунктах допустимо при соотношении в 2-5%, согласно нормативам[5].

Поэтому для производства расчётов показателей качества стока в гидрохимическом пункте, территориально удалённом от гидрологического поста, потребовалось моделирование гидрографа стока воды по ближайшему гидрологическому посту и по постам-аналогам. Эта работа была проведена Сухоноговой Е.С. ранее по методике, изложенной в [Воскресенский, 2000]. Сравнение оценок качества стока за весь период с пересчётом и без пересчёта гидрографа показало, что они практически совпадают. Поэтому оценки качества стока в гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг. обоснованно производились без пересчёта гидрографа.

В рабочей области АПК «Характеристики исходных гидрохимических данных» предоставляется возможность просмотра двух таблиц – «Количество проб по годам» и «Пределы варьирования». Количество определений в год было неоднородным и изменялось в основном от 6 до 16, редко было равно 4. Пределы варьирования измеренных значений гидрохимических показателей в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг. приведены в таблице 1. Наблюдения за загрязнением воды проводились по указанному в таблице 1 перечню гидрохимических показателей.

Полужирным шрифтом в таблице 1 отмечены показатели, значения которых в то или иное время изучаемого периода превышают ПДК для рыбохозяйственного применения[6]. Данные ПДК выбраны как наиболее жесткие.

---

[5]Наставление гидрометеорологическим станциям и постам: Выпуск 6. Часть III. Составление и подготовка к печати Гидрологического ежегодника. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. 294 с.

[6]Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Издательство ВНИРО, 1999. 304 с.

Таблица 1. Пределы варьирования измеренных значений гидрохимических компонентов в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Table 1. The limits of variation of the measured values of hydrochemical components at the point of the Seim River – Tetkino village for the period from 1993 to 2013

Гидрохимические компоненты	Размерность	Класс опасности	Пределы варьирования	
			Min	Max
Водородный показатель (pH)		Усл. 4	6,8	**8,9**
Растворенный кислород, O_2	мг/дм^3	Усл. 4	5,36	15,6
	% насыщения		**37,9**	149,2
Биохимическое потребление кислорода (БПК$_5$)	мг O_2/дм^3		0,92	**5,19**
Бихроматная окисляемость (ХПК)	мг О/дм^3	Усл. 4	7,56	**60,1**
Аммоний солевой (NH_4^+)	мг N/дм^3	4	0	**1,93**
Нитраты (NO_3^-)	мг N/дм^3	3	0,02	2,51
Нитриты (NO_2^-)	мг N/дм^3	Усл. 4	0	**0,12**
Фосфаты	мг Р/дм^3	4-э	0	**0,49**
$Fe_{общ}$	мг/дм^3	4	0,02	**0,45**
Cu^{2+}	мг/дм^3	3	0	**0,01**
Zn^{2+}	мг/дм^3	3	0	**0,012**
Cr^{6+}	мг/дм^3	3	0	0
Cr^{3+}	мг/дм^3	3	0	0,01
Ni^{2+}	мг/дм^3	3	0	0,01
Фенолы	мг/дм^3	3	0	**0,002**
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)	мг/дм^3	4	0	**0,21**
Нефтепродукты	мг/дм^3	3	0	**0,39**
Ca^{2+}	мг/дм^3	4-э	39,3	110,2
Mg^{2+}	мг/дм^3	4-э	5	39
SO_4^{2-}	мг/дм^3	4-э	13,1	96,1
Cl^-	мг/дм^3	4-э	4,8	79,9

Оценка качества стока по единичным гидрохимическим компонентам

Основные показатели качества речного стока ($V_{заг}$) и ($T_{заг}$) в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Для каждого гидрохимического компонента, каждого года и всего исследуемого периода с помощью АПК были рассчитаны основные показатели качества речного стока: продолжительности загрязнённого стока воды ($T_{заг}$,), в абсолютных (сутки) и относительных (%) значениях, а также соответствующие абсолютные (м^3) и относительные (%) объёмы загрязнённого стока воды ($V_{заг}$). Усреднённые оценки за весь период исследований с 1993 по 2013 гг. представлены в таблице 2.

Для ХПК, БПК$_5$, NO_2^-, $Fe_{общ.}$, Cu^{2+} и нефтепродуктов, наличие загрязнённого стока отмечается ежегодно в течение всего периода наблюдений. В то время как сток, загрязнённый фосфатами, имел место 19 лет, сток с насыщением воды кислородом ниже нормативного – 18 лет, загрязнённый NH_4^+ – 16 лет, СПАВ и pH – 5 лет, а сток с превышением ПДК по Zn^{2+} и фенолам только 1 год.

Таблица 2. Относительные продолжительности и объёмы загрязнённого стока в гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино, усреднённые за период с 1993 по 2013 гг.
Table 2. Relative durations and volumes of polluted runoff at the hydrochemical point of the Seim River – Tetkino village, averaged over the period from 1993 to 2013.

Компоненты	$T_{заг}$, %			$V_{заг}$, %			Количество лет наблюдений	
	Ср.	Мин.	Мак.	Ср.	Мин.	Мак.	С загрязненным стоком	Всего
pH	1,6	0	14	2,5	0	16,8	5	21
O_2	0	0	0	0	0	0	0	21
O_2% насыщения	25,6	0	61,9	28,3	0	82,8	18	21
БПК$_5$	36,7	4,4	100	49,5	3	100	21	21
ХПК	63,3	23,5	100	68,6	16,7	100	21	21
NO_2^-	62,2	17,2	100	60,9	12,4	100	21	21
NO_3^-	0	0	0	0	0	0	0	21
NH_4^+	20,9	0	79,7	26,5	0	86,1	16	21
Фосфаты	34,8	0	70,4	26,5	0	78,4	19	21
$Fe_{общ}$	43,2	4,9	91	48,7	4,4	91,6	21	21
Cu^{2+}	72,8	43,7	100	76,5	33,7	100	21	21
Zn^{2+}	0,1	0	3	0,6	0	12,4	1	21
Cr^{6+}	0	0	0	0	0	0	0	11
Cr^{3+}	0	0	0	0	0	0	0	11
Ni^{2+}	0	0	0	0	0	0	0	21
Нефтепродукты	44,4	14,3	90,1	55,1	16,4	89,1	21	21
Фенолы	0,4	0	7,1	0,3	0	6,5	1	20
СПАВ	4,7	0	29	4,2	0	27,9	5	21
Ca^{2+}	0	0	0	0	0	0	0	21
Mg^{2+}	0	0	0	0	0	0	0	21
SO_4^{2-}	0	0	0	0	0	0	0	21
Cl^-	0	0	0	0	0	0	0	21

При этом средние за период значения $V_{заг}$ % в ряду компонентов: Cu^{2+}, ХПК, NO_2^-, нефтепродукты, БПК$_5$, $Fe_{общ}$, NH_4^+, фосфаты, насыщения воды кислородом, СПАВ, Zn^{2+}, и фенолы уменьшается от 76,5 до 0,3.

Следует отметить, что максимальные значения $V_{заг}$ % для БПК$_5$, ХПК, NO_2^- и Cu^{2+} составили 100%, для фосфатов, насыщения воды кислородом, NH_4^+, нефтепродуктов и $Fe_{общ}$ также были высокими более 78%.

Тенденции изменения ежегодных значений относительных объёмов речного стока ($V_{заг}$, %) в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Рабочая область АПК «Тенденции» представляет собой набор графиков, описывающих тенденции изменения годовых значений относительной продолжительности и относительного объема загрязненного стока. Графики для $T_{заг}$, % и $V_{заг}$, % имеют большое сходство, поэтому на рисунках 1-3 представлена динамика только одного показателя $V_{заг}$, %.

На рисунке 1 совмещены многолетние кривые относительных объёмов годового стока, загрязнённого ионами аммония, нитритами и фосфатами. Можно отметить тенденцию снижения в течение всего периода долей объёма годового стока, загрязнённых ионом аммония и фосфатами. Доли стока, загрязнённые нитритами, снижаются к концу девяностых годов и имеют тенденцию возрастания после 2000 г.

Годовые значения относительного объема стока, загрязненного органическими веществами, определяемыми по ХПК, лабильными

органическими веществами по $БПК_5$ и имеющего насыщение воды кислородом ниже нормы, снижаются к 2000 г. После 2000 г. имеет место тенденция увеличения загрязненных этими компонентами долей годового объёма стока. Следует отметить, что годовые значения $V_{заг}$, % для ХПК к концу периода наблюдений (2013 год) достигают первоначально высоких значений, а для O_2 % и $БПК_5$ они значительно ниже, чем в начале периода (рисунок 2).

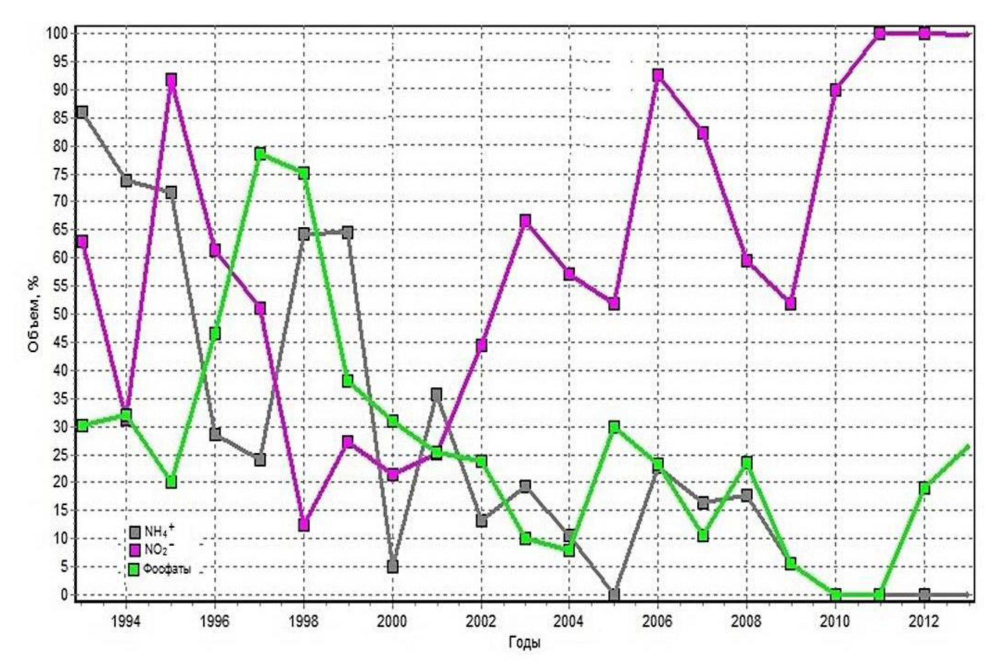


Рисунок 1. Многолетняя динамика годовых величин $V_{заг}$, % в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино для NH_4^+, NO_2^- и фосфатов

Figure 1. Long-term dynamics of annual values of V_{pollut},% at the point of the Seim River – Tetkino village for NH_4^+, NO_2^- and phosphates

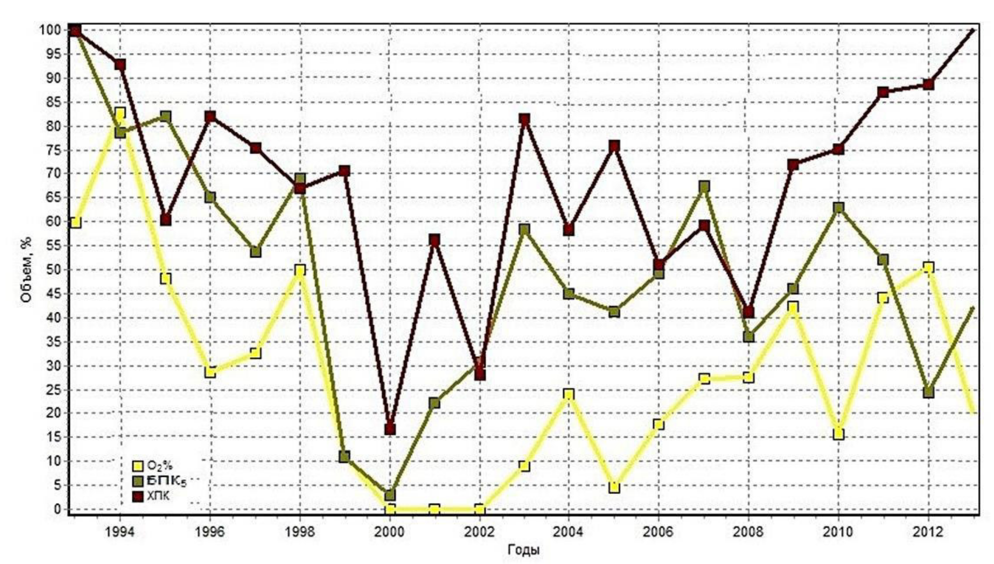


Рисунок 2. Многолетняя динамика годовых величин $V_{заг}$, % в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино для O_2 %, $БПК_5$ и ХПК

Figure 2. Long-term dynamics of annual values of V_{pollut},% at the point of the Seim River – the rivers of the Tetkino village for O_2%, BOD_5 and COD

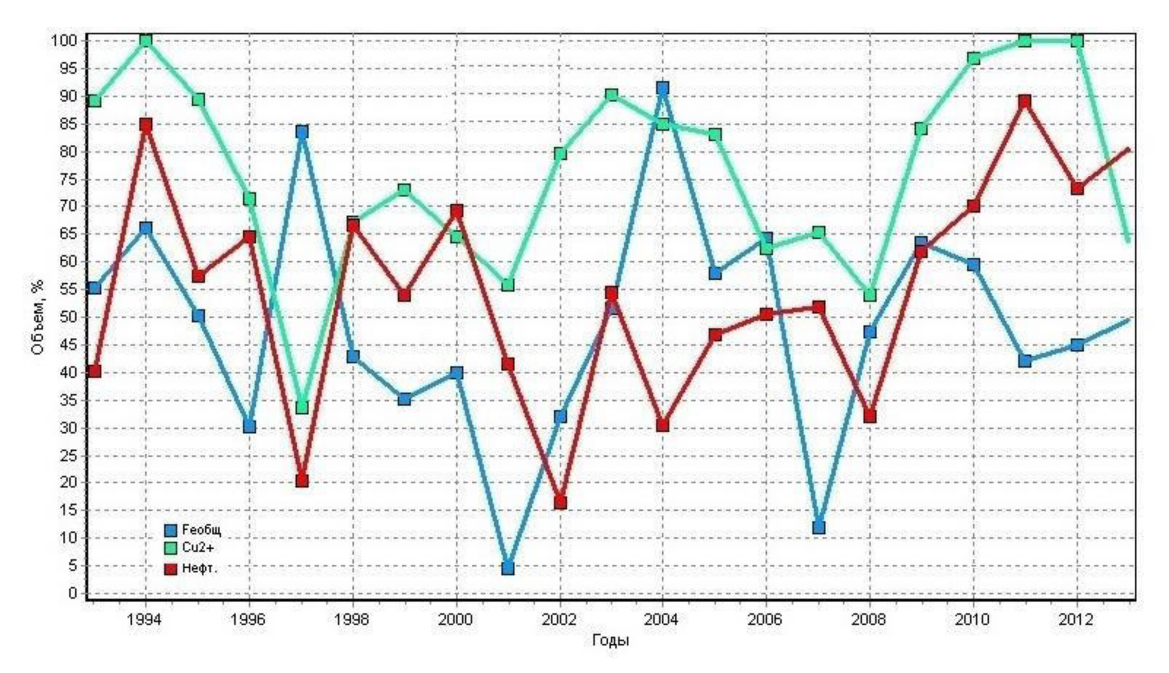


Рисунок 3. Многолетняя динамика $V_{заг}$, % в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино для $Fe_{общ}$, Cu^{2+} и нефтепродуктов
Figure 3. Long-term dynamics of the V_{pollut},% at the point of the Seym River – Tetkino village for Fe_{total}, Cu^{2+} and oil products

На рисунке 3 представлены многолетние кривые годовых значений $V_{заг}$, % для $Fe_{общ}$, Cu^{2+} и нефтепродуктов. Можно отметить значительные амплитуды колебаний годовых величин $V_{заг}$, % для перечисленных компонентов в течение всего периода наблюдений.

Оценка качества стока по совокупности загрязняющих веществ

Основные показатели качества речного стока ($V_{заг}$) и ($T_{заг}$) в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

В соответствующей рабочей области АПК для каждого года и за весь период наблюдений рассчитаны абсолютные и относительные продолжительности и объёмы загрязнённого стока воды, различающиеся по совокупности загрязняющих веществ, с определением класса загрязнённости воды и характеристикой состояния загрязнённости в данном пункте наблюдений. Все характеристики представлены в виде «паспортов качества стока».

В таблице 3 приведены «паспорта качества стока» для 1995 г. и для всего периода наблюдений с 1993 по 2013 гг.

Из приведённых данных следует, что в 1995 г. годовой объём стока р. Сейм представлен частичными объёмами разной загрязнённости: «условно чистой» водой первого класса, «слабо загрязненной» второго класса, «загрязнённой» третьего класса разряда «а» и «очень загрязнённой» третьего класса разряда «б». Средний за 1995 г. сток воды оценивается как «загрязнённый» третьего класса разряда «а».

В течение всего периода с 1993 по 2013 г. объём речного стока состоял из шести частичных объёмов следующих классов: чистого стока, «условно чистого» стока первого класса, «слабо загрязненного» второго класса, «загрязненного» третьего класса разряда «а», «очень загрязнённого» третьего класса разряда «б» и небольшого объема «грязного» стока четвертого класса разряда «а». Эти показатели говорят о высокой изменчивости качества стока, как в течение года, так и в течение всего исследуемого периода.

Усреднённый за весь период наблюдений сток воды оценивается как «слабо загрязненный» второго класса.

Таблица 3. «Паспорта качества стока» в трансграничном пункте р. Сейм – р.п. Теткино за 1995 г. и за 1993 по 2013 гг.

Table 3. “Passport of quality for river runoff” at the cross-border point of the Seim River – Tetkino village for 1995 and for 1993 2013

Годы	V стока, м³	Интервалы	$T_{заг}$, сут.	$T_{заг}$, %	$V_{заг}$, м³	$V_{заг}$, %	УКИЗВ[7]	Класс и разряд	Характеристика стока воды	Показатели с обобщённым оценочным баллом S≥ 9
1995	1,94E+09	07.06-15.06, 08.11-31.12	63	17,26	2,32E+08	11,95	0,8	1-й класс	Условно чистый	Cu^{2+}
		22.02-23.02, 13.04-22.04, 15.05-06.06, 16.06-24.09, 26.09-07.11	179	49,04	6,52E+08	33,6	1,37	2-й класс	Слабо загрязненный	$Fe_{общ}$, Cu^{2+}, NH_4^+
		01.01-21.02, 24.02-26.02, 02.03-11.03, 23.04-14.05, 25.09-25.09	88	24,11	5,51E+08	28,4	1,95	3-й класс, разряд «а»	Загрязненный	Cu^{2+}, NO_2^-, $Fe_{общ}$, NH_4^+
		27.02-01.03, 12.03-12.04	35	9,59	5,05E+08	26,05	2,16	3-й класс, разряд «б»	Очень загрязненный	NH_4^+, Feобщ, Cu^{2+}, $БПК_5$, NO_2^-
		Оценка за год	**365**	**100**	**1,94E+09**	**100**	**1,67**	**3-й класс, разряд «а»**	**Загрязненный**	**Cu^{2+}, NO_2^-, $Fe_{общ}$, NH_4^+, $БПК_5$**
1993-2013	4,07E+10	**За весь период**	208	2,71	8,81E+08	2,16	0	Чистый сток	Чистый	**$БПК_5$, NH_4^+, Cu^{2+}, $Fe_{общ}$, ХПК, NO_2^-, Нефтепродукты, Фосфаты**
			2633	34,33	1,09E+10	26,67	0,63	1-й класс	Условно чистый	
			3708	48,34	1,91E+10	46,94	1,31	2-й класс	Слабо загрязненный	
			910	11,86	7,95E+09	19,51	1,93	3-й класс, разряд «а»	Загрязненный	
			198	2,58	1,87E+09	4,59	2,38	3-й класс, разряд «б»	Очень загрязненный	
			13	0,17	5,25E+07	0,13	3,42	4-й класс, разряд «а»	Грязный	
			7670	**100**	**4,07E+10**	**100**	**1,27**	**2-й класс**	**Слабо загрязненный**	

[7] РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 48 с.

В «паспортах качества стока» приводятся гидрохимические показатели, имеющие обобщённые оценочные баллы S≥9[7]: БПК$_5$, NH_4^+, Cu^{2+}, Fe$_{общ}$, ХПК, NO_2^-, нефтепродукты и фосфаты. Они наибольшим образом влияют на степень загрязнённости речного стока.

В рабочей области АПК «Структура загрязнённости стока» представлено по годам и за весь период долевое распределение типов загрязнения по отношению к общему объему стока в виде круговой диаграммы (рисунок 4).

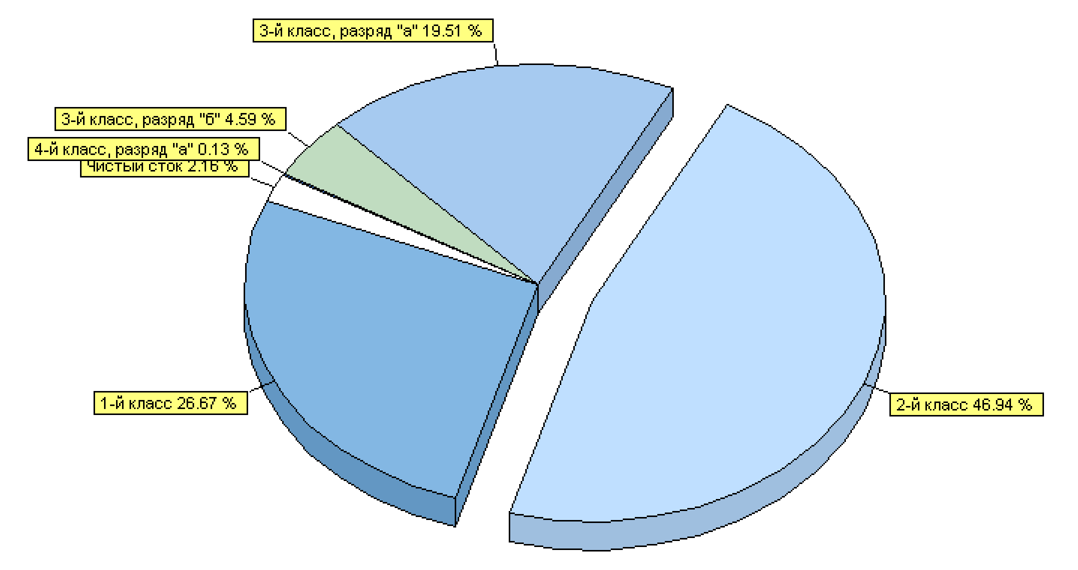


Рисунок 4. Структура качества речного стока в гидрохимическом пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Figure 4. The quality structure of the river flow in the hydrochemical point of the Seim River – Tetkino village for the period from 1993 to 2013.

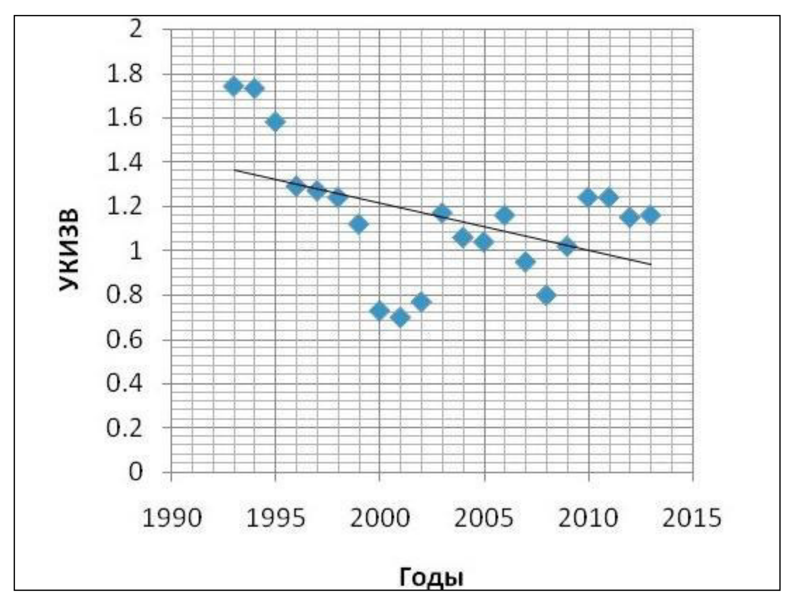


Рисунок 5. Многолетняя динамика годовых величин УКИЗВ в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино с 1993 по 2013 гг.

Figure 5. Long-term dynamics of annual values of the Specific combinatorial index of water pollution at the point of the Seim River – Tetkino village from 1993 to 2013.

[7]Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязнённости рек и водоемов. Л.: ГГИ, 1977. 72 с.

Тенденции изменения качества речного стока в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

На рисунке 5 показана динамика среднегодовых значений удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (далее – УКИЗВ)[8]. Тенденция уменьшения его значений в течение изучаемого периода позволяет предположить, что качество стока улучшается.

Факторы, влияющие на многолетнюю динамику качества стока р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Основной целью применения факторного анализа является нахождение такого небольшого по количеству набора «факторов», которые объясняют дисперсию большого числа эмпирических данных по загрязнённому стоку и могут быть прямо или косвенно связаны с определенным источником или процессом. Факторный анализ ранее успешно применялся авторами для изучения формирования временной и пространственной неоднородности разных водных объектов [Румянцева, Скакальский, 2004; Румянцева, Скакальский, 2008; Румянцева, Солнцев, Филатова, 2006, Румянцева, Бобровицкая, 2010].

В таблице 4 представлена матрица основных факторов, определяющих временное варьирование УКИЗВ, $V_{заг}$, % и $T_{заг}$, % первого, второго и третьего (разряда «а») классов качества воды, расходов и объёмов годового стока реки, в основном рассчитанных с помощью АПК, а также температуры воды в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг. Для расчетов среднегодовых температур воды, как для холодного, так и для теплого периодов были использованы значения, измеренные во время гидрохимических съёмок в указанном гидрохимическом пункте.

Таблица 4. Матрица основных факторов, определяющих временное варьирование среднегодовых величин показателей количества и качества стока воды р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Table 4. A matrix of the main factors determining the temporal variation of the average annual values of the quantity and quality of water flow in the Seim River – Tetkino village for the period from 1993 to 2013

Переменные	Факторы		
Среднегодовые величины	1	2	3
Т воды холодного периода (°C)	**-0,970**	0,013	-0,175
Т воды тёплого периода (°C)	**-0,918**	0,225	0,055
Q наибольший расход воды м^3/с	0,477	0,376	-0,258
Q наименьший расход воды м^3/с	0,529	-0,306	**0,713**
V объёмы стока м^3/г	**-0,890**	-0,061	-0,246
$T_{заг}$ воды 1 класса, %	-0,340	**0,846**	0,308
$V_{заг}$ воды 1 класса, %	-0,187	**0,816**	0,410
УКИЗ воды 1 класса	-0,305	**0,690**	-0,058
$T_{заг}$ воды 2 класса, %	**-0,971**	0,013	-0,175
$V_{заг}$ воды 2 класса, %	**-0,971**	0,013	-0,175
УКИЗ воды 2 класса	**-0,840**	-0,101	-0,014
$T_{заг}$ воды 3 класса, %	**-0,801**	-0,310	0,387
$V_{заг}$ воды 3 класса, %	**-0,902**	-0,270	0,247
УКИЗ воды 3 класса	**-0,895**	-0,275	0,277
Вклад в %	58,38	17,16	9,18

[8]Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязнённости рек и водоемов. Л.: ГГИ, 1977. 72 с.

Из таблицы 4 следует, что на многолетнее варьирование частичных объёмов стока воды «слабо загрязненной» второго класса и «загрязнённой» третьего класса разряда «а» в основном оказывает влияние фактор 1, который составляет более 58% суммарной дисперсии. Варьирование доли объёмов стока воды «условно чистой» первого класса в основном связано с фактором 2, составляющим 17% суммарной дисперсии.

Наиболее трудной задачей является интерпретация факторов. Однако очевидно, что фактор 1 напрямую связан с климатическими процессами: с температурой воды холодного и тёплого периодов, а также с объёмом годового стока реки.

В координатах двух главных факторов все годы исследуемого периода можно разделить на 3 группы:

1) с 1993 по 1999 гг.;
2) с 2001 по 2006 гг., а также 2008 г.;
3) с 2009 по 2013 гг.

При этом 2000 и 2007 годы не входят в состав этих групп и занимают особое положение на графике, отличаясь низкими значениями проекций фактора 2 (рисунок 6).

На хронологическом графике величин проекций главных факторов хорошо видна тенденция снижения влияния фактора 1 на загрязнение стока в течение исследуемого периода (рисунок 7).

По-видимому, эта закономерность обусловлена тенденцией уменьшения объёмов годового стока (рисунок 8), вызванного рядом природных факторов, а также повышением средних температур воды за теплый и особенно за холодный период года (рисунок 9).

Поскольку улучшение качества стока воды (рисунок 5) связано со снижением объёмов годового стока реки, можно предположить, что произошло уменьшение смыва аммонийных и фосфатных удобрений с сельскохозяйственных угодий[9] [Lehtoranta, Pitkanen, Sandman, 1997]. Тенденция снижения годовых значений $V_{заг}$, % в течение 1993-2013 гг. именно для этих компонентов подтверждает это предположение (рисунок 1).

[9]Haimi P., Wirkkala R.-S., Eloheimo K. Nitrogen and Phosphorus fluxes in the river Neva Final report. Finnish Environment Institute. 1997. 31 p.

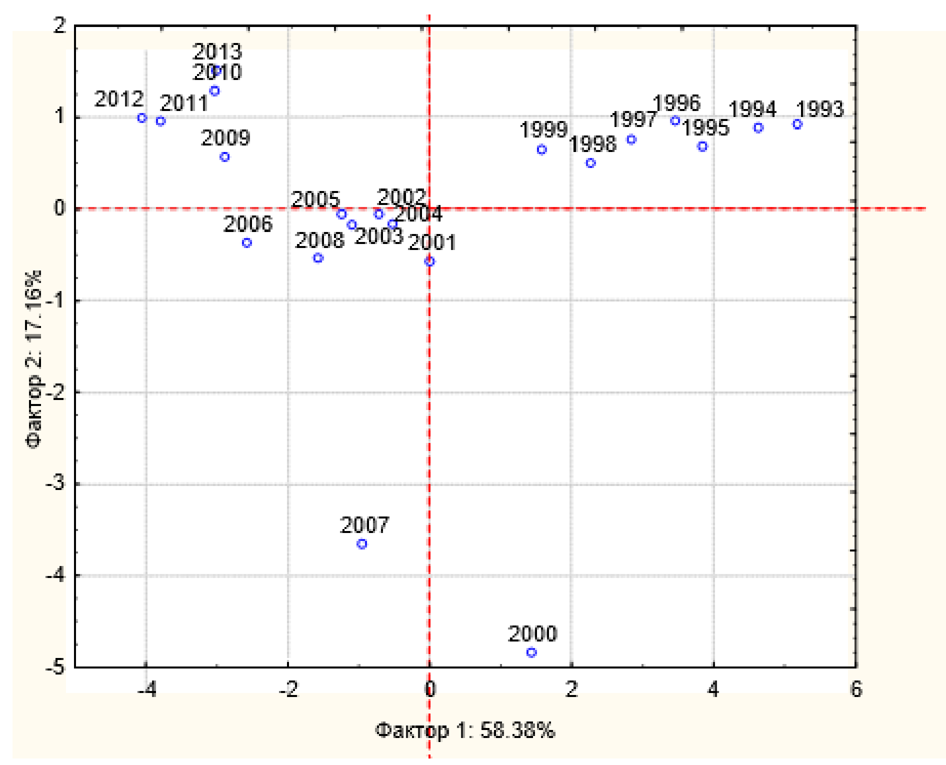


Рисунок 6. Проекция случаев (годов) в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг. в координатах главных факторов

Figure 6. The projection of cases (years) at the point of the Seim river – the river of the Tetkino village for the period from 1993 to 2013 in the coordinates of the main factors

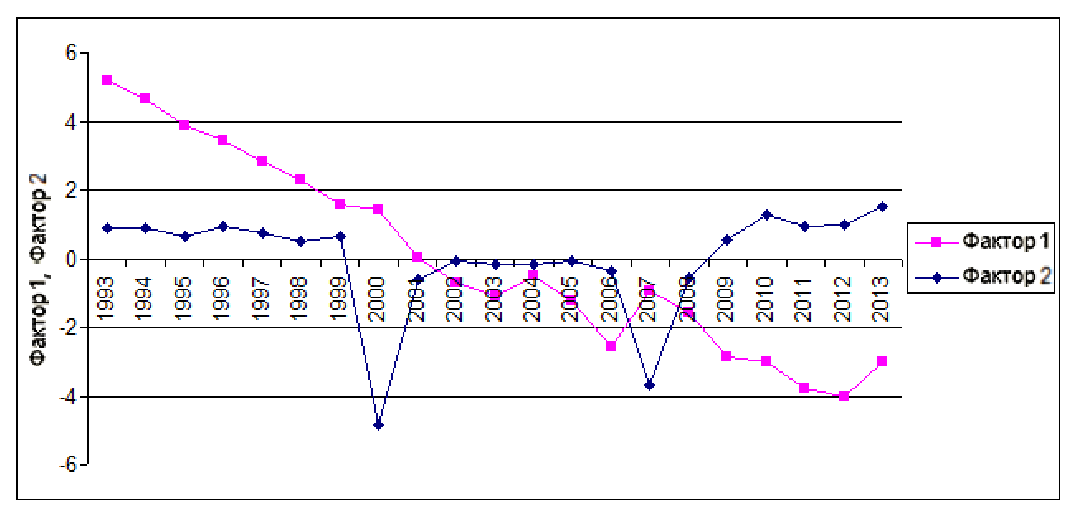


Рисунок 7. Изменение значений проекций случаев на координаты двух главных факторов р. Сейм – р. п. Теткино за период с 1993 по 2013 гг.

Figure 7. Change in the values of the projections of cases on the coordinates of the two main factors of the Seim River – Tetkino village for the period from 1993 to 2013.

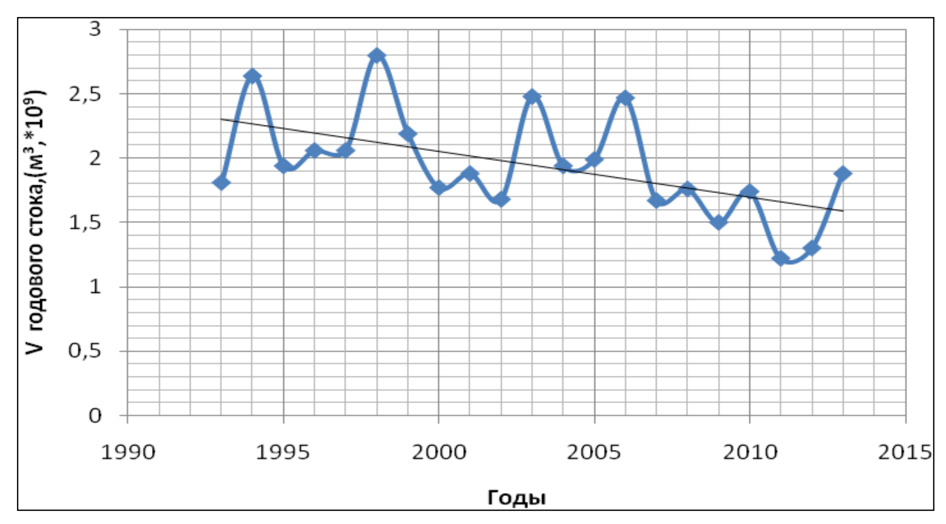


Рисунок 8. Многолетние тенденции объёма годового стока в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Figure 8. Long-term trends in annual runoff at point of the Seim River –Tetkino village for the period from 1993 to 2013

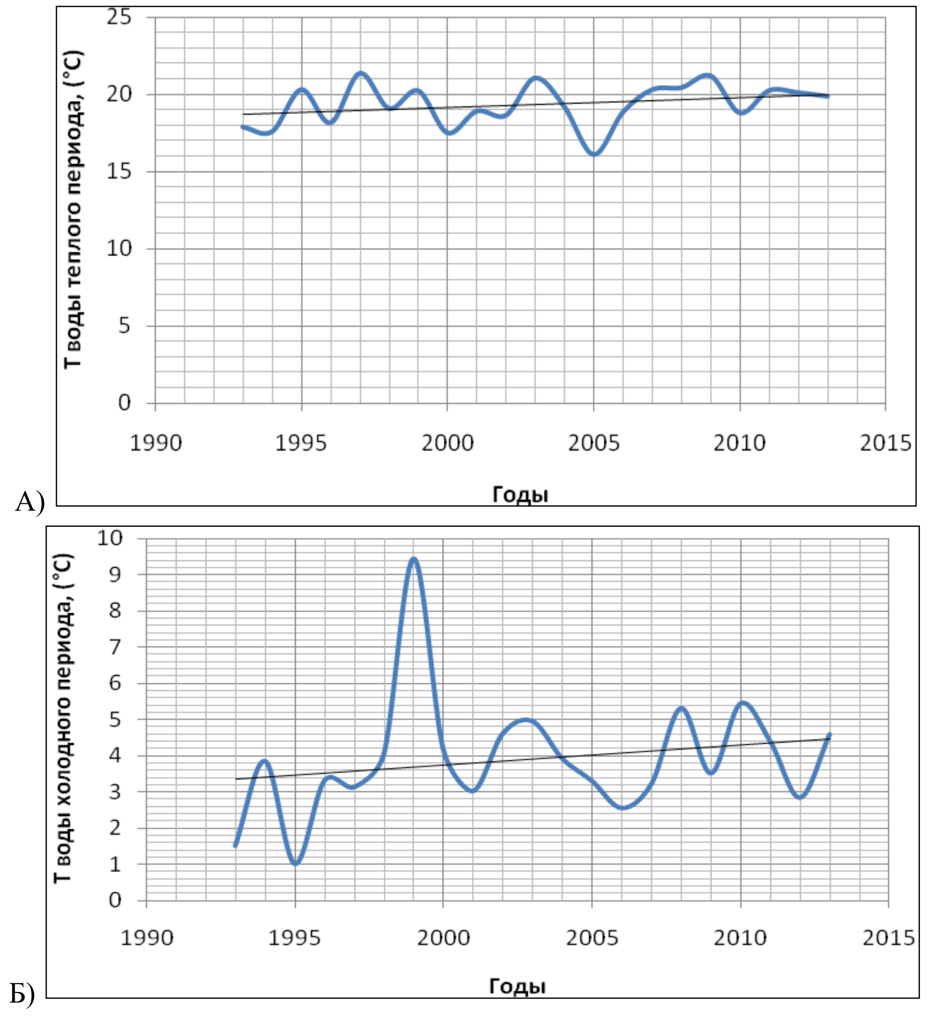


Рисунок 9. Многолетние тенденции А) средних значений температуры воды для теплого и Б) для холодного периодов года в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

Figure 9. Long-term trends A) average values of water temperature for warm and B) for cold periods of the year at point of the Seim River –Tetkino village for the period from 1993 to 2013

Выводы

1. Применение новой автоматизированной технологии, разработанной в ФГБУ «ГГИ», позволило произвести совместную обработку больших объёмов сетевой гидрохимической и гидрологической информации и рассчитать единые показатели качества и количества стока в трансграничном пункте р. Сейм – р. п. Тёткино за период с 1993 по 2013 гг.

2. Показано, что для единичных компонентов ХПК, БПК$_5$, NO_2^-, $Fe_{общ.}$, Cu^{2+} и нефтепродуктов наличие загрязнённого стока отмечается ежегодно в течение всего периода наблюдений.

Максимальные значения $V_{заг}$ для БПК$_5$, ХПК, NO_2^- и Cu^{2+} составили 100%, для фосфатов, насыщения воды кислородом, NH_4^+, нефтепродуктов и $Fe_{общ}$ также были высокими более 78%.

Рассчитаны многолетние кривые годовых значений $V_{заг}$, % для NH_4^+, NO_2^-, фосфатов, ХПК, БПК$_5$, O_2 %, $Fe_{общ}$, Cu^{2+} и нефтепродуктов.

Отмечено снижение годовых значения $V_{заг}$, % для БПК$_5$, фосфатов, O_2% и NH_4^+ в течение анализируемого периода.

3. По совокупности загрязняющих веществ показано, что усреднённый для всего периода с 1993 по 2013 гг. объём речного стока состоит из шести частичных долей, различающихся по классам и разрядам загрязнённости. Не смотря на то, что за весь период с 1993 по 2013 гг. сток воды оценивается, как «слабо загрязненный» второго класса, этот факт указывает на высокую изменчивость качества стока, в течение всего исследуемого периода.

Отмечена тенденция уменьшения среднегодовых значений УКИЗВ за период 1993-2013 гг., что позволяет сделать вывод об улучшении качества стока воды в течение этого времени.

4. Применение факторного анализа показало, что на многолетнее варьирование частичных объёмов стока воды «слабо загрязненной» второго класса и «загрязнённой» третьего класса (разряда «а») в основном оказывает влияние фактор 1, который составляет 58% суммарной дисперсии. Он напрямую связан с температурой воды холодного и тёплого периодов, а также с объёмом годового стока реки.

Выявлена тенденция снижения влияния фактора 1 на загрязнение стока в течение исследуемого периода. Показано, что тенденция улучшения качества стока воды связана со снижением объёмов годового стока и возможным уменьшение смыва загрязняющих веществ с водосбора, в частности поступления аммонийных и фосфатных удобрений с сельскохозяйственных угодий. Тенденция снижения годовых значения $V_{заг}$ % именно для этих компонентов в пункте р. Сейм – р. п. Тёткино с 1993 по 2013 гг. подтверждает это предположение.

5. Использование АПК значительно упрощает обработку и анализ данных наблюдений за качеством стока воды, так как позволяет автоматически получать расчётные характеристики основных показателей качества речного стока, которые могут быть использованы для изучения различных природных и водохозяйственных проблем.

Литература

Воскресенский О.Б. Оценка речного стока и погрешностей его расчета в системе мониторинга поверхностных вод при отсутствии и недостаточности гидрометрических наблюдений // Сборник работ по гидрологии № 24. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. С. 57-78.

Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой. М.: Статистика, 1980. 398 с.

References

Karaushev A.V. (ed.). *Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod [Methodological foundations for assessing and regulating the anthropogenic impact on surface water quality].* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 288 p. (In Russian).

Karaushev A.V., Skakal'skii B.G. Aktual'nye problemy issledovaniya kachestva poverkhnostnykh

Караушев А.В., Скакальский Б.Г. Актуальные проблемы исследования качества поверхностных вод // Метеорология и гидрология. 1973. № 10. С. 73-81.

Караушев А.В., Скакальский Б.Г. Проблемы мониторинга качества поверхностных вод суши // Проблемы современной гидрологии: сборник статей. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 94-105.

Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 288 с.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н. Многолетняя изменчивость качества воды рек Селенга и Киран на границе России и Монголии // Водные ресурсы. 2010. Том 37. № 3. С. 329-340.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н. Методика интегральной оценки многолетних изменений качества речного стока на примере р. Ворскла // Метеорология и гидрология. 2012. №5. С. 85-95.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н., Ильин Е.В. Новый подход к автоматизированному расчёту частичных объёмов речного стока разной степени загрязнения (на примере р. Селенга) // Метеорология и гидрология. 2014. №6. С. 51-60.

Румянцева Э.А., Скакальский Б.Г. Особенности многолетней динамики качества вод в системе река Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда (г. Санкт-Петербург, 28 сентября – 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург). Секция 4. Экологическое состояние водных объектов. Качество вод и научные основы их охраны. Часть 1. М.: Метеоагентство Росгидромета. С. 176-180.

Румянцева Э.А., Скакальский Б.Г. Оценка временной и пространственной неоднородности вод Невской губы и восточной части Финского залива по гидрохимическим показателям // Метеорология и гидрология. 2008. №1. С. 98-106.

Румянцева Э.А., Солнцев В.Н., Филатова Т.Н Основные черты качества вод озер Песьво и Удомля и тенденции их изменения до и после пуска Калининской АЭС // Доклады VI Всерос-

vod [Actual problems of surface water quality research]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and hydrology],* 1973, no. 10, pp. 73-81. (In Russian).

Karaushev A.V., Skakal'skii B.G. Problemy monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod sushi [Problems of monitoring land surface water quality]. *Problemy sovremennoi gidrologii: sbornik statei [Problems of Modern Hydrology: collection of Articles].* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, pp. 94-105. (In Russian).

Lehtoranta J., Pitkanen H., Sandman O. Sediment accumulation of nutrients (N, P) in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea). *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, vol. 99, iss. 1-4, pp. 477-486. DOI: 10.1023/A:1018399625103.

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Long-term variations of water quality of the Selenga and Kiran rivers at the Russian-Mongolian boundary. *Water Resources*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 372-383. DOI: 10.1134/S0097807810030115 (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Mnogoletnyaya izmenchivost' kachestva vody rek Selenga i Kiran na granitse Rossii i Mongolii. *Vodnye resursy*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 329-340).

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Technique of integral assessment of long-term variations of streamflow quality by the example of the Vorskla River. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 37, no. 5, pp. 346-353. DOI: 10.3103/S1068373912050081 (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Metodika integral'noi otsenki mnogoletnikh izmenenii kachestva rechnogo stoka na primere reki Vorskla. *Meteorologija i gidrologija*, 2012, no. 5, pp. 85-95).

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Il'in E.V. A new approach to the automatic computation of partial volumes of river runoff with various degrees of pollution (a case study for the Selenga River). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, vol. 39, no. 6, pp. 395-401. DOI: 10.3103/S1068373914060053 (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Il'in E.V. Novyi podkhod k avtomatizirovannomu raschetu chastichnykh ob"emov rechnogo stoka raznoi

сийского гидрологического съезда (г. Санкт-Петербург, 28 сентября – 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург). Секция 4. Экологическое состояние водных объектов. Качество вод и научные основы их охраны. Часть 1. М.: Метеоагентство Росгидромета, С. 181-186.

Скакальский Б.Г. Оценка качества речных вод // Методы расчёта речного стока: Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО при МГУ: в 2 частях. Часть 1. М.: изд. МГУ (МКГК ЮНЕСКО), 1980. С. 98-112.

Смыжова Е.С. Оценка стока биогенных веществ с учётом особенностей гидрохимической информации: на примере реки Великой: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. СПб., 2010. 27 с.

Шелудко В.А., Колесникова Е.В., Смыжова Е.С. Вопросы оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим данным // Материалы V Международной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» (г. Санкт-Петербург, 7-9 июля 2009 г.). СПб.: 2009. С. 30-39.

Lehtoranta J. Pitkanen H., Sandman O. Sediment accumulation of nutrients (N, P) in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) // Water, Air, and Soil Pollution. 1997. Vol. 99. Iss. 1-4. PP. 477-486. DOI: 10.1023/A:1018399625103.

stepeni zagryazneniya (na primere r. Selenga). *Meteorologija i gidrologija,* 2014, no. 6, pp. 51-60).

Rumyantseva E.A., Skakal'skii B.G. Osobennosti mnogoletnei dinamiki kachestva vod v sisteme reka Neva – Nevskaya guba – vostochnaya chast' Finskogo zaliva [Features of long-term dynamics of water quality in the system of the Neva River – Nevskaya Guba – eastern part of the Gulf of Finland]. *Doklady Shestoi Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda (g. Sankt-Peterburg, 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2004). Sektsiya 4. Ekologicheskoe sostoyanie vodnykh ob"ektov. Kachestvo vod i nauchnye osnovy ikh okhrany. [Reports of the Sixth All-Russian Hydrological Congress (St. Petersburg, September 28 – October 1, 2004). Section 4. Ecological condition of water bodies. Water quality and scientific basis for their protection].* Moscow, Publ. Meteoagentstvo Rosgidrometa, 2006, vol. 1, pp. 176-180. (In Russian).

Rumyantseva E.A., Skakal'skii B.G. Assessment of temporal and spatial inhomogeneity of waters in the Nevskaya Guba Bay and Eastern Gulf of Finland from hydrochemical indicators. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, vol. 33, no. 1, pp. 55-61. DOI: 10.1007/s11983-008-1009-y (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Skakal'skii B.G. Otsenka vremennoi i prostranstvennoi neodnorodnosti vod Nevskoi guby i vostochnoi chasti Finskogo zaliva po gidrokhimicheskim pokazatelyam. *Meteorologija i gidrologija,* 2008, no. 1, pp. 98-106)

Rumyantseva E.A., Solntsev V.N., Filatova T.N. Osnovnye cherty kachestva vod ozer Pes'vo i Udomlya i tendentsii ikh izmeneniya do i posle puska Kalininskoi AES [The main features of the water quality of lakes Pesvo and Udomlya and trends in their changes before and after the commissioning of Kalinin NPP]. *Doklady Shestoi Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda (g. Sankt-Peterburg, 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2004). Sektsiya 4. Ekologicheskoe sostoyanie vodnykh ob"ektov. Kachestvo vod i nauchnye osnovy ikh okhrany. [Reports of the Sixth All-Russian Hydrological Congress (St. Petersburg, September 28 – October 1, 2004). Section 4. Ecological condition of water bodies. Water quality and scientific basis for their*

protection]. Moscow, Publ. Meteoagentstvo Rosgidrometa, 2006, vol. 1, pp. 181-186. (In Russian).

Sheludko V.A., Kolesnikova E.V. Smyzhova E.S. Voprosy otsenki kachestva poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim dannym [Issues of surface water quality assessment by hydrochemical data]. *Materialy Pyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii «Ekologicheskie i gidrometeorologicheskie problemy bol'shikh gorodov i promyshlennykh zon» (g. Sankt-Peterburg, 7-9 iyulya 2009). [Materials of the Fifth International Conference "Ecological and Hydrometeorological Problems of Big Cities and Industrial Zones" (St. Petersburg, July 7-9, 2009)].* St. Petersburg, 2009, pp. 30-39. (In Russian).

Skakal'skii B.G. Otsenka kachestva rechnykh vod [River water quality assessment]. *Metody rascheta rechnogo stoka: Mezhdunarodnye vysshie gidrologicheskie kursy YuNESKO pri MGU: v 2 chastyakh. Chast' 1. [Methods for calculating river flow: UNESCO International Higher Hydrological Courses at Moscow State University: in 2 parts. Part 1.].* Moscow, MGU Publ. (MKGK YuNESKO), 1980, pp. 98-112. (In Russian).

Smyzhova E.S. *Otsenka stoka biogennykh veshchestv s uchetom osobennostei gidrokhimicheskoi informatsii. Avtopef. diss. kand. geogr. nauk. [Estimation of nutrient runoff taking into account the characteristics of hydrochemical information. Ph. D. (Geography) Thesis].* St. Petersburg, 2010. 27 p. (In Russian).

Überla K. *Faktorenanalyse.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977. 400 p. (Russ. ed.: Iberla K. *Faktornyi analiz.* Moscow, Statistika Publ., 1980. 398 p.)

Voskresenskii O.B. Otsenka rechnogo stoka i pogreshnostei ego rascheta v sisteme monitoringa poverkhnostnykh vod pri otsutstvii i nedostatochnosti gidrometricheskikh nablyudenii [Assessment of river runoff and its calculation errors in the surface water monitoring system in the absence and insufficiency of hydrometric observations]. *Sbornik rabot po gidrologii. No. 24. [Collection of works on hydrology, no. 24].* St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2000, pp. 57-78. (In Russian).

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 556.014

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НЕБОЛЬШИХ ПОПУСКОВ НА МАЛЫХ РЕКАХ НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ОРЕДЕЖ

А.Ю. Виноградов[1,2], Т.А. Виноградова[1,3], В.А. Обязов[1], В.А. Хаустов[4], И.А. Виноградов[1]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия;[3]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; [4]Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. В работе рассмотрено движение отрицательной и положительной волн попуска из водохранилища на р. Оредеж. Для расчёта распространения волны попуска использовалась модель неустановившегося движения воды. Попуск проводился 19.06.2017 и состоял из трёх фаз. В первую фазу затвор был перекрыт. Расход воды в реке упал с 3,6 до 2,5 м^3/с. Через час затвор был поднят и в течение получаса произведён попуск со средним расходом 4,2 м^3/с. Для наблюдения за динамикой уровней воды в реке организованы 7 постов, расположенных на расстоянии от 91,5 до 2 443 м от плотины. На большинстве створов интервал наблюдений составлял 1 минуту.

При расчёте небольших волн попусков для медленно изменяющегося неустановившегося движения в случаях, когда имеются топографические материалы, целесообразно использование одномерной модели неустановившегося движения воды (уравнения Сен-Венана). В данной мо-

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.71

SPECIALITY OF LOW RELEASE CALCULATIONS ON SMALL RIVERS ON THE EXAMPLE OF THE OREDEZH RIVER

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Tatiana A. Vinogradova[1,3], Viktor A. Obyazov[1], Vitaly A. Khaustov[4], Ivan A. Vinogradov[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia;
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia;
[3]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
[4]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. The article regards the movement of the negative and positive release waves from the reservoir on the Oredezh River. There was a model of unsteady water motion used for calculation the spread of the release wave. The release was conducted on 06/19/2017 and consisted of three phases. In the first phase, the gate was closed and the water discharge fell from 3.6 to 2.5 m^3/s. An hour later the gate was raised and during a half an hour water was released with an average flow rate of 4.2 m^3/s. There were 7 points organized to monitor the dynamics of water levels in the river. They were located at a distance of 91.5 to 2443 m from the dam. The observation interval was 1 minute on most targets.

There is advisable to use a one-dimensional model of unsteady water motion (Saint-Venant equation) for calculating small release waves of slowly changing unsteady water motion in cases where topographic materials are available. This allows to determine the stream features over the whole consid-

Виноградов А.Ю., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Хаустов В.А., Виноградов И.А. Особенности расчетов небольших попусков на малых реках на примере реки Оредеж // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 1. С. 71-81. DOI: 10.34753/HS.2019.2.1.71

дели, описываемой линейными дифференциальными уравнениями в частных производных, исходные гидравлические и морфометрические характеристики задаются вдоль всего рассматриваемого участка реки. Эта модель позволяет определить рассчитываемые характеристики потока на всём рассматриваемом протяжении реки. Система разностных уравнений решается методом прогонки. В результате прямой и обратной прогонки получают значения расходов и уровней воды вдоль всего русла для очередного расчётного интервала времени. Определение величин расходов и уровней воды для последней точки последнего участка производится на основе граничных условий, к которым добавляются граничные разностные уравнения. После этого производится обратная прогонка.

Эксперимент показал, что используемая модель позволяет проводить расчёты неустановившегося движения воды на малых реках при попусках сравнимых с первоначальным расходом и даже кратно меньшим. Максимальные расхождения между измеренными и рассчитанными уровнями при прохождении отрицательной волны в створах не превысили 15,0 см, положительной – 4,0 см.

Ключевые слова: моделирование расходов и уровней воды; попуск на малой реке; скорость волны попуска; уравнение неустановившегося движения; формула Лагранжа; численный метод Института гидродинамики.

ered river extension. The system of difference equations is solved by the tridiagonal matrix algorithm. The values of the water discharge and water levels for the next estimated time interval are obtained along the entire channel as a result of this shuttle.

The experiment indicated that the used model makes it possible to calculate the unsteady water movement on small rivers with releases comparable to the initial water discharge and even less. The maximum variences between the measured and calculated water levels during the negative wave did not exceed 15.0 cm, and the positive one – 4.0 cm.

Keywords: simulation of water discharge and water levels; release on a small river; release wave velocity; unsteady motion equation; Lagrange formula; Institute of Hydrodynamics numerical method.

Введение

При попусках из водохранилищ на реках образуются волны, которые оказывают влияние на расположенные в нижних бьефах населённые пункты, мосты, водозаборы и т.п. В связи с этим определение параметров волн попусков имеет важное практическое значение. Для расчёта этих параметров используются разнообразные методы. Адекватность методов реальным условиям возможно проверить путём изучения волн попусков в естественных условиях. Такие исследования проводились в СССР в середине XX века на следующих объектах:

1. В нижнем бьефе Иваньковской ГЭС на р. Волга [Гильденблат, Меркулов, Семиколенов, 1948]: максимальный расход попуска составил 250 м^3/с при первоначальном расходе в 25 м^3/с.
2. В нижнем бьефе Новотверецкой ГЭС на р. Тверца в 1959 году [Грушевский, 1964]: амплитуда расходов – 22-130 м^3/с.
3. В нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС на р. Иртыш [Грушевский, Русинов, Федосеев, 1965]: использовались волны половодья 1948 (3200 м^3/с), 1953(3200 м^3/с), 1955 (5700 м^3/с) и 1964 годов (3700 м^3/с).

Vinogradov A.Yu., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Khaustov V.A., Vinogradov I.A. Speciality of low release calculations on small rivers on the example of the Oredezh river. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 71-81 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.2.1.71

4. В нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС на р. Свирь в 1961 году [Иванова, Рупперт, 1966]: амплитуда расходов – 600-1250 $м^3/с$.
5. В нижнем бьефе Белогорской ГЭС на р. Оредеж в 1961 г. [Розенберг, 1968]: амплитуда расходов – 5-25 $м^3/с$.
6. В нижнем бьефе Новосибирской ГЭС на р. Обь [Дохнадзе, 1968]: максимальные амплитуды уровней составили 1,3 м.

В последующие десятилетия подобные работы практически не выполнялись. Все вышеперечисленные попуски характеризуются большими амплитудами, максимум волны кратно превосходил первоначальные расходы в русле. За исключением Белогорской ГЭС, эксперименты проводились на достаточно крупных реках.

Расчёты неустановившегося движения воды в реках, т.е. расчёты распространения волн попусков и паводков, связаны с удовлетворением запросов различных отраслей народного хозяйства. Так, при проектировании гидроузлов вычисляется ход уровней и расходов на значительном протяжении нижнего бьефа ГЭС при различных режимах работы станции, определяемых водностью года, сезоном, днём недели, временем суток и т.д. Особенно важно при этом для различных створов определение значений как максимальных уровней воды (из-за опасности затопления населённых пунктов, мостов, дорог, промышленных предприятий), так и минимальных (для обеспечения речного судоходства и нормального функционирования водозаборов), а также определение расходов воды и скоростей течения. Успешное решение практических вопросов, связанных с расчётами неустановившегося движения воды в реках, все в большей степени зависит не только от разработки теории и методов расчётов, но и от того, как будут применяться существующие методы расчёта. Поэтому центр тяжести проблемы при расчётах неустановившегося движения воды все более перемещается в область разработки оптимальных способов создания информационной базы для расчёта, наилучшим образом учитывающих специфику явления и позволяющих проводить расчёты на основе одномерных уравнений неустановившегося движения воды.

В данной работе проведён попуск на р. Оредеж и для расчёта распространения волны попуска использовалась модель неустановившегося движения воды (численная схема Института гидродинамики СО АН СССР).

Общие сведения об объекте исследования

Река Оредеж – правый приток реки Луги, бассейн Балтийского моря. Река берет начало недалеко от деревни Пятая Гора Волосовского района Ленинградской области (абсолютная отметка 110 м). Впадает в реку Луга (абсолютная отметка 31,8 м) с правого берега вблизи посёлка Плоское Лужского района Ленинградской области.

Длина реки Оредеж составляет 192 км, площадь водосборного бассейна 3 220 $км^2$. Общее падение реки от истока к устью составляет 78,2 м, соответственно уклон – 0,41 м/км. Русло реки извилистое, но сравнительно стабильное, коэффициент извилистости составляет 2,73.

Попуск проводился путём маневрирования одним из трёх затворов основного водосброса плотины бывшей Даймищенской ГЭС. Адрес плотины: Ленинградская область, Гатчинский район, д. Чикино. Волна попуска распространялась на участке длиной до 6 км вплоть до подпорной части верхнего бьефа Рождественской плотины. На рассматриваемом участке долина U-образная, шириной 200-250 м, коренные берега крутые, высотой 4-6 м. Нижний бьеф Даймищенской (Чикинской) ГЭС разбит на участки, ограниченные 7 створами. Пойма в районе створов 1, 2 и 3 двухсторонняя, шириной около 40, 250 и 85 м соответственно. В 4-м створе она имеет ширину около 80 м, в 5-м и 6-м – до 50 м и располагается только по правому берегу. В районе 7-го створа пойма левосторонняя, шириной до 90 м.

Исходные данные

Попуск проводился 19.06.2017 и состоял из трёх фаз. В первую фазу в 12 часов дня был перекрыт один из затворов. Остальные два затвора во время проведения эксперимента были закрыты. Расход воды в реке упал с 3,6 до 2,5 $м^3/с$.

Уровень воды в водохранилище поднялся за час на 3,5 см, после чего, в 13 часов, затвор был поднят и в течение получаса, до 13.30, произведён попуск со средним расходом 4,2 м^3/с. В 13:30 затвор был возвращён в первоначальное положение. Таким образом, отклонения от среднего расхода не превысили 35%.

Для наблюдения за динамикой уровней воды в реке организованы 7 постов, расположенных в 91,5; 274,5; 885; 907,3; 1396,5; 1442 и 2443 м от плотины. Водомерная сеть привязана к реперу водомерного поста р. Оредеж – Чикино нивелировкой технического класса.

На 4, 6 и 7 створах интервал наблюдений составлял 1 минута, на 3 – наблюдения с таким интервалом начаты с 82 минуты эксперимента, на 5 створе – с 52 минуты, на 1 и 2 створах – интервал составил 10 минут.

Наблюдения за скоростью течения в точке велись на 1, 2, 4 и 6 створах.

Графики попуска (рисунок 1) начинаются с момента перекрытия одного из затворов в 12:00 19 июня.

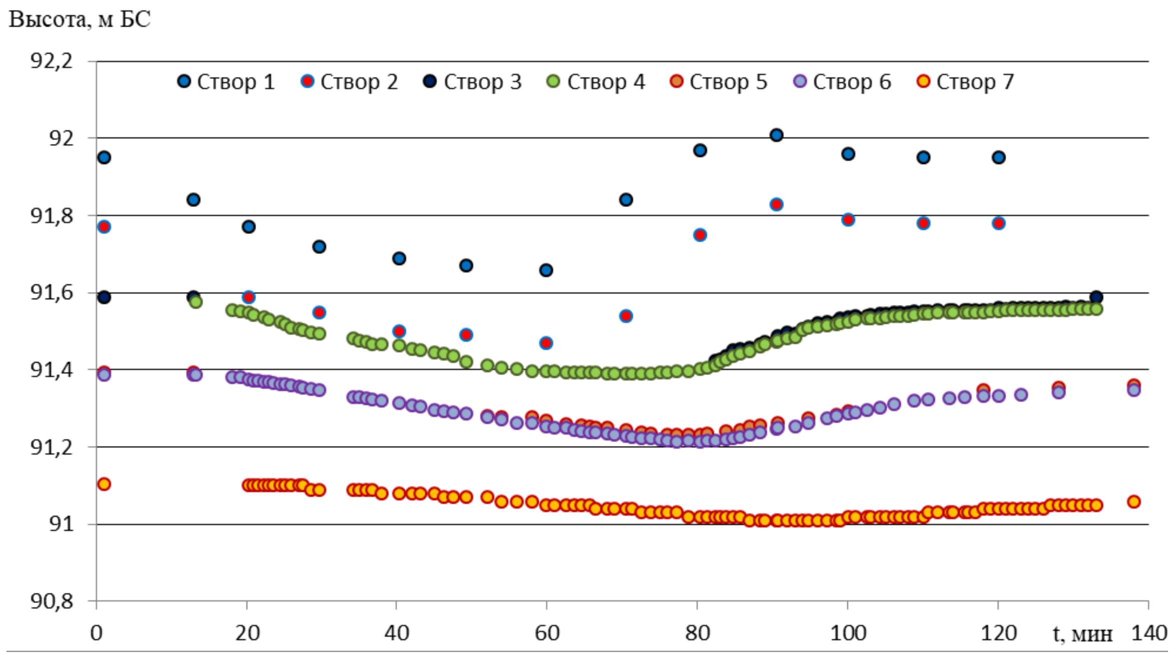


Рисунок 1. Измеренные уровни воды в створах 1-7 с 12:00 до 14:00 19.06.2017 г.
Figure 1. Measured water levels on 1-7 targets from 12:00 till 14:00 06/19/2017

Методика

При расчёте небольших волн попусков для медленно изменяющегося неустановившегося движения в случаях, когда имеются топографические материалы, целесообразно использование одномерной модели неустановившегося движения воды (уравнения Сен-Венана). Река ниже плотины разбита на участки, ограниченные вышеуказанными створами.

В используемой одномерной модели неустановившегося движения воды, описываемой линейными дифференциальными уравнениями в частных производных, исходные гидравлические и морфометрические характеристики задаются вдоль всего рассматриваемого участка реки. Эта модель позволяет определить рассчитываемые характеристики потока (уровень, расход воды и среднюю скорость течения, а также изменяющиеся гидравлико-морфометрические характеристики) на всём рассматриваемом протяжении реки.

Дифференциальные уравнения неустановившегося движения воды в открытых руслах в общем случае (при наличии бокового притока) состоят из уравнения динамического равновесия (1) и уравнения неразрывности (2):

$$I = i_o - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\alpha}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{g\omega} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \qquad (2)$$

где I – поверхностный уклон, б/р;

i_0 – уклон дна, б/р;

x – координата, м;

h – глубина, м;

$\frac{\partial h}{\partial x}$ – дополнительный уклон, связанный с изменением глубин по длине русла, б/р;

t – время, с;

α и β – коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2;

V – средняя скорость, м/с;

C – коэффициент Шези, м$^{1/2}$/с;

R – гидравлический радиус (для широкого открытого русла его можно заменить глубиной h), м;

q – боковой приток на единицу длины, м^2/с;

ω – площадь живого сечения, м^2, при соответствующей отметке уровня Z, м;

Q – расход, м^3/с.

Независимыми переменными в данных уравнениях являются: координата x и время t, а их функциями – глубина h и средняя скорость V. При заданной форме русла, площадь живого сечения ω в рассматриваемом створе является известной функцией глубины, а расход Q определяется как произведение V и ω.

Первое слагаемое в правой части динамического уравнения (1) учитывает изменение скоростей по длине (отражает неравномерность течения). Этот член для рек обычно невелик и имеет значительную величину лишь в зонах резкого изменения сечения. Второе слагаемое – уклон, связанный с изменением скоростей во времени; он также обычно мал, кроме зоны резкого неустановившегося движения (вблизи ГЭС при попусках суточного регулирования). Третье слагаемое правой части – уклон трения, играет важную роль для речных участков.

Расчёт ведётся по неявной разностной схеме. Шаг Δx может быть различным для разных участков, шаг Δt – меняться в течение времени. Производные заменяются разностными отношениями:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}\approx\frac{\widetilde{Q}_n-Q_n}{\Delta t}, \qquad \frac{\partial Z}{\partial t}\approx\frac{\widetilde{Z}_n-Z_n}{\Delta t}, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x}\approx\frac{\widetilde{Q}_{n+1}-\widetilde{Q}_{n-1}}{2\Delta x}, \qquad \frac{\partial Z}{\partial x}\approx\frac{\widetilde{Z}_{n+1}-\widetilde{Z}_{n-1}}{2\Delta x}, \qquad (4)$$

где $\widetilde{Q}$ и $\widetilde{Z}$ – искомые величины в момент $t+\Delta t$.

Система разностных уравнений решается методом прогонки. В результате прямой и обратной прогонки получают значения Q и Z вдоль всего русла или системы русел для очередного расчётного интервала времени, т.е. выполняется расчёт очередного слоя.

Определение величин Q и Z для последней точки последнего участка производится на основе граничных условий, к которым добавляются граничные разностные уравнения. После этого производится обратная прогонка.

В Институте гидродинамики составлена компьютерная программа [Виноградова, 1986], которая предусматривает возможность расчёта простого русла без разветвлений, что имеет место в рассматриваемом случае.

Результаты исследования и обсуждение

Выделяют различные скорости распространения волн попусков: скорость распространения возмущения; скорость добегания гребня волны; скорость добегания экстремального расхода [Грушевский, 1969].

Скорость распространения возмущения (фронта волны) $v_ф$ (таблица 1), оценена по формуле Лагранжа:

$$v_ф = v_0+\sqrt{gH_{ср}}, \qquad (5)$$

где $v_ф$ – скорость распространения фронта волны, м/с;

v_0 – начальная скорость, м/с;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2;

$H_{ср}$ – средняя глубина, м.

Скорости добегания гребня волны $v_г$ и распространения заметного возмущения [Грушевский, 1969] (заметных объёмов воды или

главной части волнового возмущения) $v_в$ были измерены непосредственно в ходе эксперимента (таблицы 2-4). По осреднённой скорости течения в точке (таблица 5) время добегания экстремального расхода (таблица 6) вычислено приближённо.

Таблица 1. Время и скорость добегания отрицательной волны по Лагранжу
Table 1. Time and velocity of a negative wave by Lagrange formula

№ створа	Расстояние от плотины, м	Морфометрические характеристики русла	Скорость добегания $v_ф$, м/с	Время добегания волны, мин
Створ 2	274,5	прямой участок	2,84	1,6
Створ 4	907,3	3 излучины	2,84	5,3
Створ 6	1442	5 излучин	2,81	8,5
Створ 7	2443	9 излучин + бифуркация	2,69	15,1

Таблица 2. Время и скорость распространения заметного возмущения
Table 2. Time and velocity of a perceptible disturbance propagation

№ створа	время добегания возмущения, мин		скорость добегания $v_в$, м/с	
	отрицательной волны	положительной волны	отрицательной волны	положительной волны
Створ 4	13	14	1,16	1,08
Створ 6	13,3	21,3	1,81	1,13
Створ 7	28,6	40	1,42	1,02

Таблица 3. Время и скорость прохождения гребня положительной волны
Table 3. Time and velocity of positive wave top

№ створа	расстояние от плотины, м	время добегания, мин		скорость прохождения $v_г$, м/с	
		измеренное	расчётное	измеренная**	расчётная
Створ 1	91,5	90*	90	0,66	0,37
Створ 2	274,5	90*	91	0,63	0,41
Створ 3	885	113	110	-	0,32
Створ 4	907,3	113	111	0,39	0,26
Створ 5	1396,5	123	123	-	0,29
Створ 6	1442	123	124	0,33	0,30
Створ 7	2443	127	128	0,23	0,31

* – Дискретность измерений не позволяет установить более точное время прохождения гребня.

** – Измеренная скорость – скорость в точке, расчётная – средняя по сечению.

Таблица 4. Время и скорость прохождения гребня отрицательной волны
Table 4. Time and velocity of negative wave top

№ створа	расстояние от плотины, м	время добегания, мин		скорость прохождения $v_г$, м/с	
		измеренное	расчётное	измеренная**	расчётная
Створ 1	91,5	60*	60	0,71***	0,31
Створ 2	274,5	60*	60	0,36	0,32
Створ 3	885	68	64	-	0,26
Створ 4	907,3	68	65	-	0,25
Створ 5	1396,5	80	72	-	0,25
Створ 6	1442	80	73	0,25	0,25
Створ 7	2443	87	92	0,36	0,28

* – Дискретность измерений не позволяет установить более точное время прохождения гребня.
** – Измеренная скорость – скорость в точке, расчётная – средняя по сечению.
*** – Принята измеренная скорость до открытия затвора

Таблица 5. Измеренные скорости в точке на створах, м/с
Table 5. The measured velocities at a point on the targets, m/s

Время, мин	Створ №1	Створ №2	Створ №4	Створ №6	Створ №7
0	-	-	0,30	0,28	-
20	-	0,35	-	-	-
30	0,64	0,36	-	-	0,31
40	0,69	0,38	-	-	0,22
50	0,71	0,37	-	0,27	0,23
60	0,82	0,36	-	0,27	0,2
70	0,86	0,60	-	0,23	0,19
80	0,78	0,73	0,30	0,28	0,15
90	0,66	0,63	0,36	0,36	0,15
100	0,64	0,59	0,37	0,38	0,17
110	0,68	0,59	0,39	0,35	0,20
120	0,68	0,60	0,38	0,33	0,23
180	-	-	-	-	0,29

Таблица 6. Прохождение экстремумов расходов в створах, м^3/с
Table 6. Transit of extremes water discharge at the targets, m^3/s

Время, мин	Створ №1	Створ №2	Створ №4	Створ №6	Створ №7
0	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
60	2,2	2,5			
70			2,5		
80				2,3	1,9
90	4,1	4,0			
120			4,3	4,2	

Для данного эксперимента расчётный интервал времени Δt принят равным 1 минуте. За начало расчёта принято 00 часов, за конец – 16 часов 19 июня 2017 года. До закрытия затвора в 12:00 движение воды считается установившимся. Результаты расчётов представлены на рисунке 2.

Начальные отметки (на 12:00) по створам при условии установившегося движения воды с

расходом Q_o, равным среднесуточному расходу, приведены в таблице 7.

Результаты расчёта уровней при прохождении гребней отрицательной и положительной волн представлены в таблице 8.

В использованной схеме не учтены такие морфометрические особенности русла, как излучины (на всем протяжении нижнего бьефа их насчитывается 9) и наличие на расстоянии 2 175 м от плотины старицы, спрямлённой новой протокой, а также поймы. Поэтому надо иметь в виду, что реальные скорости могут существенно изменяться по ширине русла. В используемой расчётной схеме применено одномерное неустановившееся движение жидкости, что подразумевает пренебрежение поперечными и вертикальными составляющими скорости, а также центробежными инерционными силами, имеющие место на излучинах.

Коэффициент шероховатости рассчитан по створу №4 обратным путём, исходя из измеренной морфометрии русла и расходов воды, и принят постоянным для всего участка.

Наибольшие расхождения между измеренными и рассчитанными уровнями при прохождении отрицательной волны в створах не превышают 15,0 см, положительной – 4,0 см. Бóльшее расхождение при расчётах отрицательной волны объясняется, помимо вышеприведённых соображений, низким качеством измерения морфометрических русловых характеристик, особенно значимых при малых уровнях (при средней глубине в 0,63 м, амплитуда значений уровней при попусках достигала 0,4 м). Точность расчёта характеристик положительной волны весьма приемлема и близка к точности измерений.

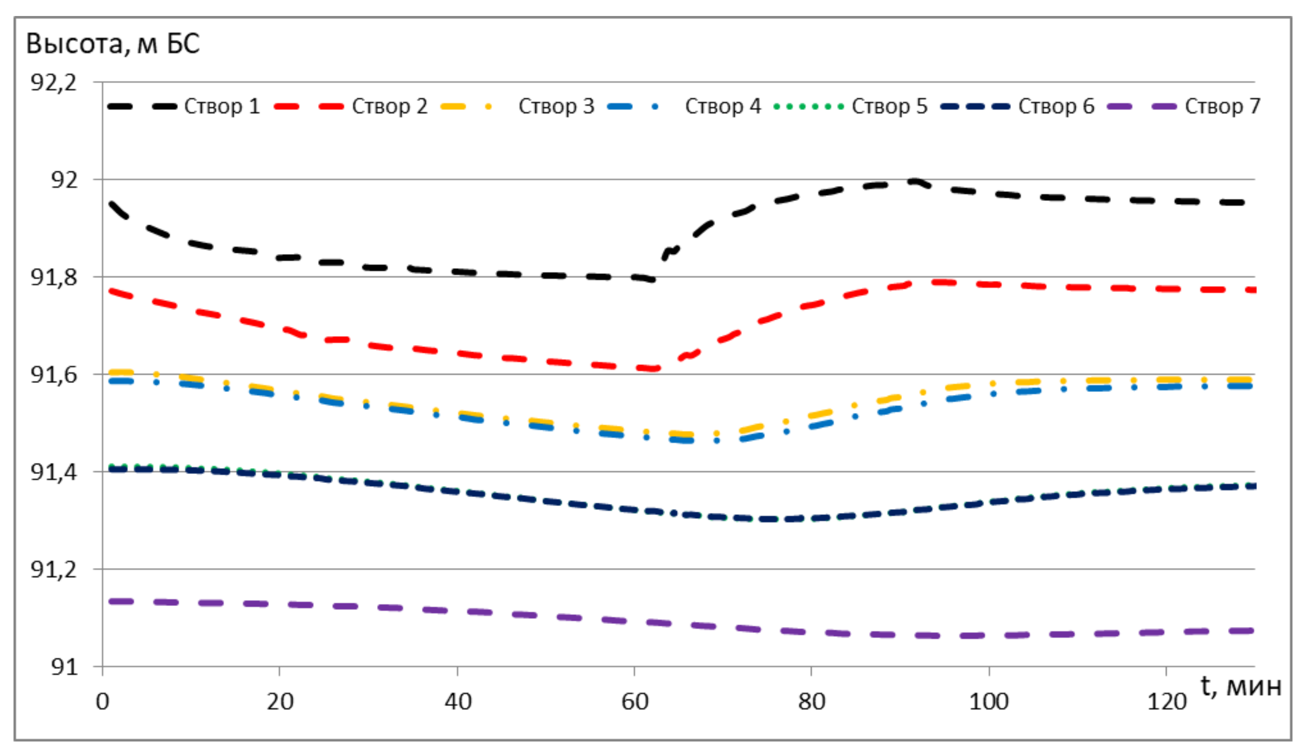


Рисунок 2. Рассчитанные уровни воды в створах 1-7 с 12:00 до 14:00 19.06.2017 г.

Figure 2. Calculated water levels on 1-7 targets from 12:00 till 14:00 06/19/2017

Таблица 7. Начальные отметки уровней в створах

Table 7. Initial water level marks at the targets

Уровни, м	Створ №1	Створ №2	Створ №3	Створ №4	Створ №5	Створ №6	Створ №7
измеренный	91,95	91,77	91,59	91,58	91,39	91,39	91,10
расчётный	91,95	91,78	91,60	91,59	91,41	91,41	91,13

Таблица 8. Измеренные и рассчитанные уровни при прохождении экстремумов волн
Table 8. Measured and calculated levels during the transit of wave extremes

№ створа	Отрицательная волна, м		Положительная волна, м	
	измеренный	расчётный	измеренный	расчётный
Створ 1	91,66*	91,80	92,01	92,00
Створ 2	91,46*	91,61	91,83	91,79
Створ 3	-	91,48	91,56	91,59
Створ 4	91,39	91,46	91,55	91,57
Створ 5	91,23	91,30	91,35	91,37
Створ 6	91,22	91,30	91,34	91,37
Створ 7	91,01	91,06	91,05	91,07

* – Дискретность измерений не позволяет установить более точный уровень экстремума волны

Выводы

Формула Лагранжа может применяться только на прямолинейных участках русла, непосредственно вблизи водосбросных сооружений.

Несмотря на множество допущений, используемая модель позволяет проводить расчёты неустановившегося движения воды на малых реках при попусках сравнимых с первоначальным расходом и даже кратно меньшим. Максимальные расхождения между измеренными и рассчитанными уровнями при прохождении отрицательной волны в створах не превышают 15,0 см, положительной – 4,0 см. Точность расчёта характеристик положительной волны весьма приемлема и укладывается в точность измерений.

При расчётах отрицательной волны, модель даёт завышенные результаты, что объясняется низким качеством измерения морфометрических русловых характеристик, особенно значимых при малых уровнях и при выходе воды на пойму (уровень выхода на пойму в эксперименте не был достигнут).

Необходимо отметить очень важный момент – наилучшее совпадение результатов расчёта имеет место при коэффициенте шероховатости, определённым по измеренным расходам воды и морфометрии створа (даже если это всего один створ). Тот факт, что в ежегодниках перестали публиковать таблицы измеренных расходов воды, приносит большой вред проектным расчётам. По данным прошлого столетия пытаются определить морфометрию створа и коэффициент шероховатости, хотя эти данные уже носят очень ориентировочный характер. Пора остро поставить вопрос о возобновлении в кадастровых материалах таблиц измеренных расходов воды.

Задача дальнейших работ – оценка влияния поймы и излучин на уровенный режим. Для этого необходимо границы участков располагать таким образом, чтобы они охватывали, по возможности, все излучины реки. Расход попуска при этом не должен превышать 4,5-5 м^3/с. Влияние поймы необходимо оценивать при попусках с расходом не менее 6 м^3/с.

Литература

Виноградова Т.А. Закономерности распространения волны половодья в Обско-Тазовской устьевой области. Дисс. … канд. геогр. наук. Л., 1987. 172 с.

Гильденблат Я.Д., Меркулов В.В., Семиколенов А.С. Неустановившийся режим в нижнем бьефе гидростанции. М.: АН СССР, 1948. 144 с.

References

Gil'denblat Ya.D., Merkulov V.V., Semikolenov A.C. *Neustanovivshiisya rezhim v nizhnem b'efe gidrostantsii [Unsteady mode in the downstream of the hydroelectric station]*. Moscow, Publ. of USSR Academy of Sciences, 1948. 144 p. (In Russian).

Grushevskii M.S. O vliyanii poim na rasplastyvanie voln popuskov (po materialam nablyudenii GGI na

Грушевский М.С. О влиянии пойм на распластывание волн попусков (по материалам наблюдений ГГИ на р. Тверце) // Труды ГГИ. Выпуск 117. Исследования неустановившегося движения воды в естественных руслах и водоемах / Под ред. Н.Е. Кондратьева, М.С. Грушевского. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. С. 56-62.

Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 337 с.

Грушевский М.С., Русинов М.И., Федосеев В.А. Расчеты затопления поймы р. Иртыша // Труды ГГИ. Выпуск 121. Исследования неустановившегося движения воды в открытых потоках / Под ред. М.С. Грушевского. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. С. 56-68.

Дохнадзе Г.П. Исследование распространения волн попусков на р. Оби в зимних условиях методом численного эксперимента // Труды ГГИ. Выпуск 140. Исследования и расчеты неустановившегося движения воды в реках / Под ред. М.С. Грушевского. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. С. 91-107.

Иванова А.А., Рupперт М.Л. Расчет распространения волн попусков на р. Свири в зимних и летних условиях и сопоставление его с натурными данными // Труды ГГИ. Выпуск 136. Исследования неустановившегося движения воды и русловых процессов / Под ред. Н.Е. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1966.

Розенберг Л.И. Особенности расчета неустановившегося движения воды в условиях подпора // Труды ГГИ. Выпуск 161. Исследования неустановившегося движения воды и грядового перемещения наносов / Под ред. М.С. Грушевского. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 58-64.

reke Tvertse) [On the effect of floodplains on the spreading of waves of releases (based on observations of the GGI on the Tverts river)]. In Kondrat'ev N.E., Grushevskii. M.S. (eds.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 117. Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody v estestvennykh ruslakh i vodoemakh [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 117. Investigations of the unsteady movement of water in natural channels and reservoirs].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1964, p. 56-62. (In Russian).

Grushevskii M.S. *Volny popuskov i pavodkov v rekakh [Waves of releases and floods in the rivers].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1969. 337 p. (In Russian; abstract in English).

Grushevskii M.S., Rusinov M.I., Fedoseev V.A. Raschety zatopleniya poimy reki Irtysha [Calculations of flooding of the Irtysh River floodplain]. In Grushevskii M.S. (ed.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 121. Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody v otkrytykh potokakh [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 121. Studies of the unsteady movement of water in open streams].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1965, pp. 56-68. (In Russian).

Dokhnadze G.P. Issledovanie rasprostraneniya voln popuskov na reke Obi v zimnikh usloviyakh metodom chislennogo eksperimenta [he study of the propagation of releases waves on the Ob River in winter conditions by the method of numerical experiment]. In Grushevskii M.S. (ed.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 140. Issledovaniya i raschety neustanovivshegosya dvizheniya vody v rekakh [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 140. Investigations and calculations of unsteady water movement in rivers].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1967, pp. 91-107. (In Russian).

Ivanova A.A., Ruppert M.L. Raschet rasprostraneniya voln popuskov na reke Sviri v zimnikh i letnikh usloviyakh i sopostavlenie ego s naturnymi dannymi [Calculation of the propagation of waves of releases on the Svir River in winter and summer conditions and its comparison with field data]. In

Kondrat'ev N.E. (ed.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 136. Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody i ruslovykh protsessov [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 136. Investigations of Unsteady Water Movement and Channel Processes]*. Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1966. (In Russian).

Rozenberg L.I. Osobennosti rascheta neustanovivshegosya dvizheniya vody v usloviyakh podpora [Features of the calculation of unsteady water movement in conditions of backwater]. In Grushevskii M.S. (ed.) *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 161. Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody i gryadovogo peremeshcheniya nanosov [Transactions of the State Hydrological Institute. Issue 161. Investigations of the unsteady movement of water and ridge movement of sediment].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1968, pp. 58-64. (In Russian).

Vinogradova T.A. *Zakonomernosti rasprostraneniya volny polovod'ya v Obsko-Tazovskoi ust'evoi oblasti. Diss. kand. geogr. nauk [Patterns of propagation of a flood wave in the Ob-Taz estuary region. Ph. D. (Geography) Thesis]*. Leningrad, 1987. 172 p. (In Russian).

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ
SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 556.536

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.82

НЕРАЗМЫВАЮЩИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ДЛЯ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1],
Т.А. Виноградова[1,3], М.М. Кадацкая[1]

[1]ООО Научно-производственное объединение "Гидротехпроект", г. Валдай, Россия;
[2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия; [3]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

NON-ERODING WATER VELOCITIES FOR INCOHERENT BOTTOM SEDIMENTS

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Viktor A. Obyazov[1],
Tatiana A. Vinogradova[1,3],
Mariya M. Kadatskaya[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia;
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia;
[3]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
gd@npogtp.ru

Аннотация. Значения неразмывающих скоростей для различных типов донных отложений (связных и несвязных) приводятся в нормативной документации в виде таблиц и графиков. Кроме этого, существует ряд нормативных документов, содержащих методики их расчета. Эти методики основаны на эмпирических зависимостях, адаптированных к конкретным специфическим условиям. Расчетные значения средних неразмывающих скоростей пропорциональны глубине потока и диаметру частиц в случае размыва несвязных донных отложений.

Авторами статьи сделана попытка оценить неразмывающую скорость потока путем физического подхода к проблеме в зависимости от угла внутреннего трения, расчетного сцепления несвязных донных отложений (грунтов) и глубины водной толщи над размываемым участком дна. Данный подход должен являться универсальным.

Анализ полученных результатов показал, что предложенная формула расчета придонных неразмывающих скоростей во всех рассмотренных случаях дает результаты значительно больше значений, приведенных в нормативных документах для соответствующих градаций

Abstract. There are the values of non-eroding water velocities for various types of bottom sediments (incoherent and cohesive) given in the normative documentation in the form of tables and graphs. Also there are a number of regulatory documents containing methods for calculation such velocities. These methods are based on empirical dependencies adapted to specific conditions. The calculated mean non-eroding water velocities are proportional to the depth of flow and bottom particle size in the case of incoherent bottom sediments erosion.

The authors made an attempt to estimate non-eroding water velocity by a physical approach to the problem depending on the internal friction angle, the calculated clutch of incoherent bottom sediments and the depth of the water over the bottom. This approach should be universal.

An analysis of the results indicated that the proposed formula for calculating bottom non-eroding water velocities in all considered cases gives results significantly higher than the values given in the regulatory documents for the corresponding size of incoherent bottom sediments. As a result authors obtained non-eroding water velocities, which were overestimated at times on the basis of expert evaluation. When the depth changes from 0.5 to 10 m, the

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Vinogradova T.A., Kadatskaya M.M. Non-eroding water velocities for incoherent bottom sediments. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 2, iss. 1, pp. 82-89. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.2.1.82

крупности несвязных донных отложений. В результате расчетов были получены неразмывающие скорости, на основании экспертной оценки, завышены в несколько раз. При изменении глубины потока от 0,5 до 10 м разброс оцененных придонных скоростей колеблется от 14 до 22% в зависимости от крупности несвязного грунта.

Сделан вывод, что чем меньше частицы несвязного грунта, тем меньше отклонение рассчитанных значений придонных неразмывающих скоростей от нормативных (для крупнозернистых гравелистых песков при глубине потока 10 м отклонение от нормативных значений достигают 375-510%). Кроме того, прослеживается зависимость величин придонной неразмывающей скорости от глубины потока, что не предусмотрено нормативными документами.

Авторы предлагают научному сообществу подключиться к обсуждению причин таких несоответствий.

Ключевые слова: придонная неразмывающая скорость; несвязные грунты; прочностные характеристики грунтов; закон Кулона; касательные напряжения; коэффициент шероховатости; коэффициент гидравлического трения.

spread of estimated bottom velocities varies from 14 to 22%, depending on the size of the incoherent soil.

It was concluded that for smaller particles of incoherent soil, the less deviation of the calculated values of bottom non-eroding water velocities from the normative ones (for massive gravel sands at a 10 m flow depth, the deviation from the normative values reaches 375-510%). In addition, the dependence of the value bottom non-eroding water velocity on the depth is traced, which is not provided in regulatory documents.

The authors offer the scientific community to join to discussion of the reasons for these discrepancies.

Keywords: bottom non-eroding water velocity; incoherent bottom sediments; strength features of soils; Coulomb's law; shear stresses; roughness coefficient; hydraulic friction coefficient.

Условные обозначения

$V_{ср}$ – средняя скорость потока, м/с;

$V_{нр}$ – средняя неразмывающая скорость, м/с;

α, β и γ – эмпирические коэффициенты[1];

H – глубина потока, м;

$d_{ср}$ – средний диаметр частиц донных отложений, м;

σ – нормальное давление грунта, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;

ρ_S – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к объему твердой части этого грунта, принят равным 2660 кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2;

ε – пористость, определяемая по формуле $\varepsilon = 1 - \dfrac{\rho_d}{\rho_S}$;

ρ_d – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему, кг/м^3;

τ – напряжение, препятствующее сдвигу участка дна, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;

φ – угол внутреннего трения размываемого грунта, град.;

c – сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;

τ_c – сдвигающее напряжение, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;

ρ_0 – плотность воды, 1000 кг/м^3;

V_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с: $V_* = \sqrt{gHi}$;

i – гидравлический уклон, б/р;

[1] СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. М.: Трансстрой, 1996.

C – коэффициент Шези, $м^{1/2}/с$, определяемый по формуле Н.Н. Павловского: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$;
R – гидравлический радиус, $R \approx H$, м;
n – коэффициент шероховатости, в условиях отсутствия гряд и других форм микрорельефа рассчитывается по формуле Штриклера: $n = \frac{d^a}{b}$, при этом коэффициенты $a = \frac{1}{6} \approx 0{,}17$; $b = \frac{\sqrt{g}}{0{,}15} \approx 20{,}88$ [Барышников, 2003].
$V_{прд}$ – осредненная продольная придонная скорость на глубине *y*, м/с;
y – ордината по оси, перпендикулярной поверхности дна потока, м;
Δ – высота выступов шероховатостей, м, определяемая по формуле $\Delta = \frac{2}{3} d$;
λ – коэффициент гидравлического трения, б/р;
k – эмпирический коэффициент при расчете λ, принятый равным 3,5 [Боровков, Волынов, 2013];
c_p – расчетное сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;
$c_н$ – нормативное сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot с^2)$;
γ_g – коэффициент надежности по грунту, используемый при оценке c_p, при отсутствии данных испытаний образцов грунта можно принимать максимальное значение $\gamma_g = 2$[2].

Введение

Одним из основных параметров для инженерных расчетов водопропускных и водоотводных сооружений является неразмывающая скорость [Кадацкая и др., 2019]. Основным критерием устойчивости проектируемого сооружения является выполнение условия $V_{ср} < V_{нр}$.

Значения неразмывающих скоростей для различных типов донных отложений (связных и несвязных) приводятся в нормативной документации в виде таблиц и графиков. Кроме этого, существует ряд нормативных документов, содержащих методики их расчета, например СП 32-102-95[3].

Эти методики основаны на эмпирических зависимостях, адаптированных к конкретным специфическим условиям. Расчетные значения средних неразмывающих скоростей пропорциональны глубине потока и диаметру частиц в случае размыва несвязных донных отложений и среднему размеру смываемых частиц (агрегатов, «отдельностей») в случае размыва связного грунта и в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$V_{нр} \approx \alpha \cdot H^{\beta} \cdot d_{ср}^{\gamma} \quad (1)$$

Значения коэффициентов могут различаться в несколько раз [Кадацкая и др., 2019] в зависимости от местных условий, что неприемлемо с точки зрения универсальности.

Попытаемся оценить неразмывающую скорость путем физического подхода к проблеме.

Методика

Нормальное давление или сжимающее напряжение σ, оказываемое смываемым грунтом на единичную площадку, равно:

$$\sigma = (\rho_S - \rho_0) g d_{cp} (1 - \varepsilon) \quad (2)$$

Напряжение, препятствующее сдвигу размываемого участка дна, площадью *S*, равно:

$$\tau = \sigma \cdot tg\varphi + c = (\rho_S - \rho_0) g d_{cp} (1 - \varepsilon) \cdot tg\varphi + c \quad (3)$$

Сдвигающее касательное напряжение на границе дно-поток [Гришанин, 1969]:

$$\tau_c = \rho_0 V_*^2 = \rho_0 \cdot gHi = \frac{\rho_0 g V_{cp}^2}{C^2} \quad (4)$$

Сдвиг донной отмостки произойдет в момент, когда $\tau_c > \tau$. Критическое равновесие имеет место при равенстве $\tau_c = \tau$. Запишем это уравнение в виде:

[2] Там же
[3] Там же

$$\rho_0 g \frac{V_{cp}^2}{C^2} = \sigma \cdot tg\varphi + c \quad (5)$$

$$V_{cp} = \sqrt{\frac{C^2 \tau}{\rho_0 g}} = C\sqrt{Hi} \quad (6)$$

Уравнение (6) выражает зависимость средней неразмывающей скорости от угла внутреннего трения и сцепления грунта или донных отложений, являясь универсальным для любых грунтов.

К придонной скорости можно, например, перейти по зависимости В.Н. Гончарова [Кадацкая и др., 2020]:

$$V_{прд} = V_{cp} \frac{1{,}25}{\lg 6{,}15 \frac{H}{\Delta}} \quad (7)$$

Также возможен расчет неразмывающих скоростей с использованием коэффициента гидравлического трения λ вместо коэффициента Шези. В этом случае сдвигающее напряжение турбулентного потока будет определяться по формуле [Барышников, 2003]:

$$\tau_c = \rho_0 \lambda \frac{V_{cp}^2}{2} \quad (8)$$

$$\rho_0 \lambda \frac{V_{cp}^2}{2} = \sigma \cdot tg\varphi + c\ . \quad (9)$$

откуда

$$V_{cp} = \sqrt{\frac{2\tau}{\rho_0 \lambda}} \quad (10)$$

Для расчета λ могут использоваться формулы: А.П. Зегжды (11), В.Н. Гончарова (12), Маннинга-Штриклера (13) [Виноградов и др., 2019]:

$$\lambda = \frac{1}{(4\lg H / kd_{cp} + 4{,}25)^2} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{(4\lg 6{,}15H / kd_{cp})^2} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{2}{(V_{cp} / V_*)^2} \quad (13)$$

По формуле 13 оценивается правильность вычисленного соотношения значений скорости и коэффициента гидравлического трения.

Результаты и их обсуждение

Проведены расчеты неразмывающих скоростей при условии движения равномерного плоского потока с несвязными донными отложениями, условно состоящими из однородных песков.

Значения угла внутреннего трения песчаных грунтов четвертичных отложений для расчетов взяты из таблицы 1 Приложения 1 СНиП 2.02.01-83 (нормативные) и таблицы 1.4 [Ялтанец и др., 2008] (водонасыщенные пески). Значения сцепления для переувлажненных аллювиальных пылеватых песков получены опытным путем.

Придонные неразмывающие скорости рассчитаны по формуле (7) с учетом формулы (6). Результаты расчетов представлены в таблице 1 для различных градаций песчаных грунтов. Для сравнения приведены нормативные значения придонных неразмывающих скоростей для соответствующих градаций крупности несвязных донных отложений в соответствии с таблицей 6 СО 34.21.204-2005[4] и таблицей 2 ВТР-П-25-80[5].

Стоит отметить, что значения средних скоростей потока, полученные по формуле (10), отличаются от полученных по зависимости (6) скоростей не более чем на 5%.

[4] СО 34.21.204-2005 Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: Из-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006.
[5] ВТР-П-25-80 Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. М.: Из-во Мин-ва мелиорации и водного хозяйства СССР, 1981.

Таблица 1. Результаты расчетов придонной неразмывающей скорости течения
Table 1. Calculated bottom non-eroding water velocity

Параметры	Глубина, м				
	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Мелкий гравий (*d*=2 мм; *n* =0,017; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =35°; *τ* =13,9кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,002836	0,001418	0,000473	0,000284	0,000142
Коэффициент Шези, С, м$^{1/2}$/с	52,4	58,8	70,6	76,9	86,3
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,97	2,22	2,66	2,90	3,25
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,73	0,75	0,80	0,83	0,87
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Крупный песок (*d*=1 мм, *n* =0,015; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =32°; *τ* =6,2кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,001265	0,000633	0,000211	0,000127	0,000063
Коэффициент Шези, С, м$^{1/2}$/с	58,8	66,0	79,3	86,3	96,9
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,48	1,66	1,99	2,17	2,44
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,50	0,52	0,56	0,58	0,61
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Средний песок (*d*=0,5 мм, *n* =0,013; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =28°; *τ* =2,64кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,000538	0,000269	0,000090	0,000054	0,000027
Коэффициент Шези, С, м$^{1/2}$/с	66,0	74,1	89,0	96,9	108,8
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,08	1,22	1,46	1,59	1,78
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Средний песок (*d*=0,2 мм, *n* =0,012; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =25°; *τ* =0,92кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,000189	0,000094	0,000031	0,000019	0,000009
Коэффициент Шези, С, м$^{1/2}$/с	76,9	86,3	103,7	112,9	126,7
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	0,75	0,84	1,01	1,10	1,23
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105
Мелкий песок (*d*=0,1 мм, *n* =0,01; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =22°; *τ* =0,90кг/(мс²); *c*=0,5 Па)					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,000184	0,000092	0,000031	0,000018	0,000009
Коэффициент Шези, С, м$^{1/2}$/с	86,3	96,9	116,4	126,7	142,3
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	0,83	0,93	1,12	1,21	1,36
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,22	0,23	0,26	0,27	0,29

Параметры	Глубина, м				
	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115
Пылеватый песок (*d*=0,05 мм, *n* =0,009; *ε*=0,39; *e*=0,64; *φ* =20°; *τ* =1,18кг/(мс²); *c*= 1 Па)					
Гидравлический уклон, *i*, б/р	0,000241	0,000120	0,000040	0,000024	0,000012
Коэффициент Шези, С, $м^{1/2}/с$	96,9	108,8	130,6	142,3	159,7
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,06	1,19	1,43	1,56	1,75
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,27	0,28	0,31	0,33	0,35
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Для сравнения в таблице 2 приведены расчеты неразмывающих скоростей для мелких и пылеватых песков по тем же формулам, но с учетом нормативных значений угла внутреннего трения и сцепления, приведенных в таблице 1 Приложения 1 СНиП 2.02.01-83. Сцепление для песков таких размеров уже имеет место, поскольку они в плотном состоянии начинают приобретать характеристики связности. Меньшие значения угла внутреннего трения и сцепления корректированы согласно [Ялтанец и др., 2008] и СП 32-102-95 Приложение А.6.

Нормативные значения удельного сцепления c_n п.2.75 прил. 1 Пособие к СНиП 2.02.01-83 [15] . Эти значения при практических расчетах должны быть скорректированы в сторону уменьшения, согласно СП 32-102-95 Приложение А.6., где указано, что «при расчете местных размывов основной характеристикой связного грунта является расчетное сцепление c_p, определяемое по формуле $c_p = c_n / \gamma_g$, где c_n — нормативное сцепление, определяемое... в состоянии капиллярного водонасыщения при полной влагоемкости; γ_g – коэффициент надежности по грунту, при отсутствии данных испытаний образцов грунта можно принимать максимальное значение $\gamma_g = 2$».

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная формула расчета придонных неразмывающих скоростей во всех рассмотренных случаях дает результаты значительно больше нормативных значений, приведенных в ВТР-П-25-80 и СО 34.21.204-2005 для соответствующих градаций крупности несвязных отложений. Полученные скорости, на основании экспертной оценки, завышены в несклькоо раз.

Таблица 2. Расчетные величины средних неразмывающих скоростей потока, м/с, при различных глубинах для мелкозернистых и пылеватых песков

Table 2. Calculated values of average non-eroding water velocities, m/s, at various depths for fine-grained and dusty sands

песок	*φ* , **град**	с, Па	Н, м				
			0,5	1	3	5	10
мелкозернистый	22	1000	27,6	31,0	37,2	40,5	45,4
	32	2000	39,0	43,8	52,6	57,2	64,2
пылеватый	18	2000	43,8	49,1	59,0	64,2	72,1
	30	4000	61,9	69,5	83,4	90,8	102,0

[15] Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986.

Стоит отметить, что согласно нормативным документам значения придонных неразмывающих скоростей не зависят от глубины потока, в то время как формулы (4) и (7) в явном виде демонстрирует такую зависимость. При изменении глубины потока от 0,5 до 10 м разброс оцененных придонных скоростей колеблется от 14 до 22% в зависимости от крупности несвязного грунта.

Ранее авторами [Кадацкая и др., 2020] было показано, что неразмывающая скорость на выступе шероховатостей однородных несвязных грунтов крупностью 1 мм при средней скорости потока 0,5 м/с и глубине потока 5 м, рассчитанная с использованием различных подходов, находится в пределах 0,132-0,175, что вполне совпадает с нормативными данными, и меньше рассчитанных по формуле (7) на 300 и более процентов (таблица 1).

Выводы

1) чем меньше частицы несвязного грунта, тем меньше отклонение рассчитанных значений придонных неразмывающих скоростей от нормативных (для крупнозернистых гравелистых песков при глубине потока 10 м отклонение от нормативных значений достигают 375-510%);
2) прослеживается зависимость величин придонной неразмывающей скорости от глубины потока, что не предусмотрено нормативными значениями;
3) по результатам расчетов становится понятным, почему для расчетов неразмывающих скоростей ни разу не использовались физически обоснованные методики. Расчеты, проведенные по элементарным формулам, с использованием нормативных значений угла внутреннего трения и сцепления приводят к нереальным значениям.

Авторы предлагают научному сообществу подключиться к обсуждению причин таких несоответствий.

Литература

Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел: учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2003. 147 с.

Боровков В.С., Волынов М.А. Размыв речного русла в грунтах, обладающих сцеплением // Вестник МГСУ. 2013. Том 8. № 4. С. 143-149. DOI:10.22227/1997-0935.2013.4.143-149

Виноградов А.Ю., Кадацкая М.М., Бирман А.Р., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бачериков И.В., Коваленко Т.В., Хвалев С.В., Парфенов Е.А. Расчёт неразмывающих скоростей водного потока на высоте верхней границы пограничного слоя // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 3. С. 44-61. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4782.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 428 с.

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Беленький Ю.И., Бачериков И.В., Хвалев С.В., Каляшов В.А. Анализ методов расчета неразмывающей скорости при проектировании водопропускных и водоотводных сооружений лесного

References

Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel: Uchebnoe posobie [Hydraulic resistance of river channels].* Saint-Petersburg, Publ. of the Russian State Hydrometeorological University, 2003. 147 p. (In Russian).

Borovkov V.S., Volynov M.A. Razmyv rechnogo rusla v gruntakh, obladayushchikh stsepleniem [River bed erosion in cohesive soils]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*, 2013, vol. 8, iss. 4, pp. 143-149. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.22227/1997-0935.2013.4.143-149

Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1969. 428 p. (In Russian).

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Belen'kii Yu.I., Bacherikov I.V., Khvalev S.V., Kalyashov V.A. Analiz metodov rascheta nerazmyvayushchei skorosti pri proektirovanii vodopropusknykh i vodootvodnykh sooruzhenii lesnogo khozyaistva [Analysis of methods for calculating non-eroding speed in the design of culverts

хозяйства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 174-187. DOI:10.21266/2079-4304.2019.227.174-187

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Обязов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Беленький Ю.И., Бирман А.Р., Хвалев С.В., Кучмин А.В., Бачериков И.В., Коваленко Т.В. Расчет неразмывающих скоростей на высоте выступов шероховатости донных отложений // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 80-84. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-80-84

Ялтанец И.М., Тухель А.Э., Леванов Н.И., Дятлов В.М. Переработка горных пород с использованием средств гидромеханизации: Учебное пособие. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. 318 с.

and drainage forestry facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii [Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii]*, 2019, iss. 227, pp. 174-187. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.174-187

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Belen'kii Yu.I., Birman A.R., Khvalev S.V., Kuchmin A.V., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V. Raschet nerazmyvayushchikh skorostei na vysote vystupov sherokhovatosti donnykh otlozhenii [Calculation of non-eroding velocities at the height of surface asperity of bottom sediments]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2020, 1(45), pp. 80-84. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-80-84

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M., Birman A.R., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V., Khvalev S.V., Parfenov E.A. Raschet nerazmyvayushchikh skorostei vodnogo potoka na vysote verkhnei granitsy pogranichnogo sloya [Calculation of non-eroding water flow velocities at the height of the upper boundary layer]. *Resources and Technology [Resources and Technology]*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 44-61. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.15393/j2.art.2019.4782.

Yaltanets I.M., Tukhel' A.E., Levanov N.I., Dyatlov V.M. *Pererabotka gornykh porod s ispol'zovaniem sredstv gidromekhanizatsii: Uchebnoe posobie [Rock Processing Using Hydromechanization: A Training Manual]*. Moscow, Publ. of Moscow State Mining University, 2008. 318 p. (In Russian).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли.
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Экологические проблемы и опасности в гидросфере.
4. Эволюция гидросферы.
5. Методы, модели и технологии.
6. Вопросы совершенствования нормативной документации.
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования.
8. Научные дискуссии.
9. Наследие.
10. Хроника.

Плата за публикации статей не взымается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;

- шрифт Times New Roman, размер – 11 pt;

- междустрочный интервал – множитель 1,15, переносы в словах не допускаются;

- абзацный отступ – 1 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);

- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;

- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);

- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);

- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);

- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;

- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащпй актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;

- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;

- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;

- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Отсылка на затекстовые библиографические ссылки приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *Фамилия И.О.* Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на материалы в сборнике конференции: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 9 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); авторская справка. При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 250 слов).

Подробные правила приведены http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena" in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes in the hydrosphere: fundamental and engineering aspects
3. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
4. The evolution of the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Monitoring, experimental and expeditionary research
8. Scientific discussions
9. Heritage
10. Chronicles

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal's website in the public domain. Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 11 pt;
- line spacing – 1,15, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)' name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figuries should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the curent article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. *Title of book*. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book.* City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. *Title of thesis. Thesis type.* City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Conference Proceedings (date and place of the conference)*, City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49-53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49-53. Available at: http://example.com/example.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);
academic degree and title;
organization affiliation with full address (including Post Code);
position in organization;
contact telefon (for all authors);
contact e-mail (for all authors);
scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena": http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements

Научное издание

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ.

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: М.М. Кадацкая

На обложке фото В.П. Благовещенского, рисунки М.А. Виноградовой

Подписано в печать 07.04.2020. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская
Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.04.2020

Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект»
Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений:
199155 Санкт-Петербург, а/я 136

Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28





© 2020 «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены.